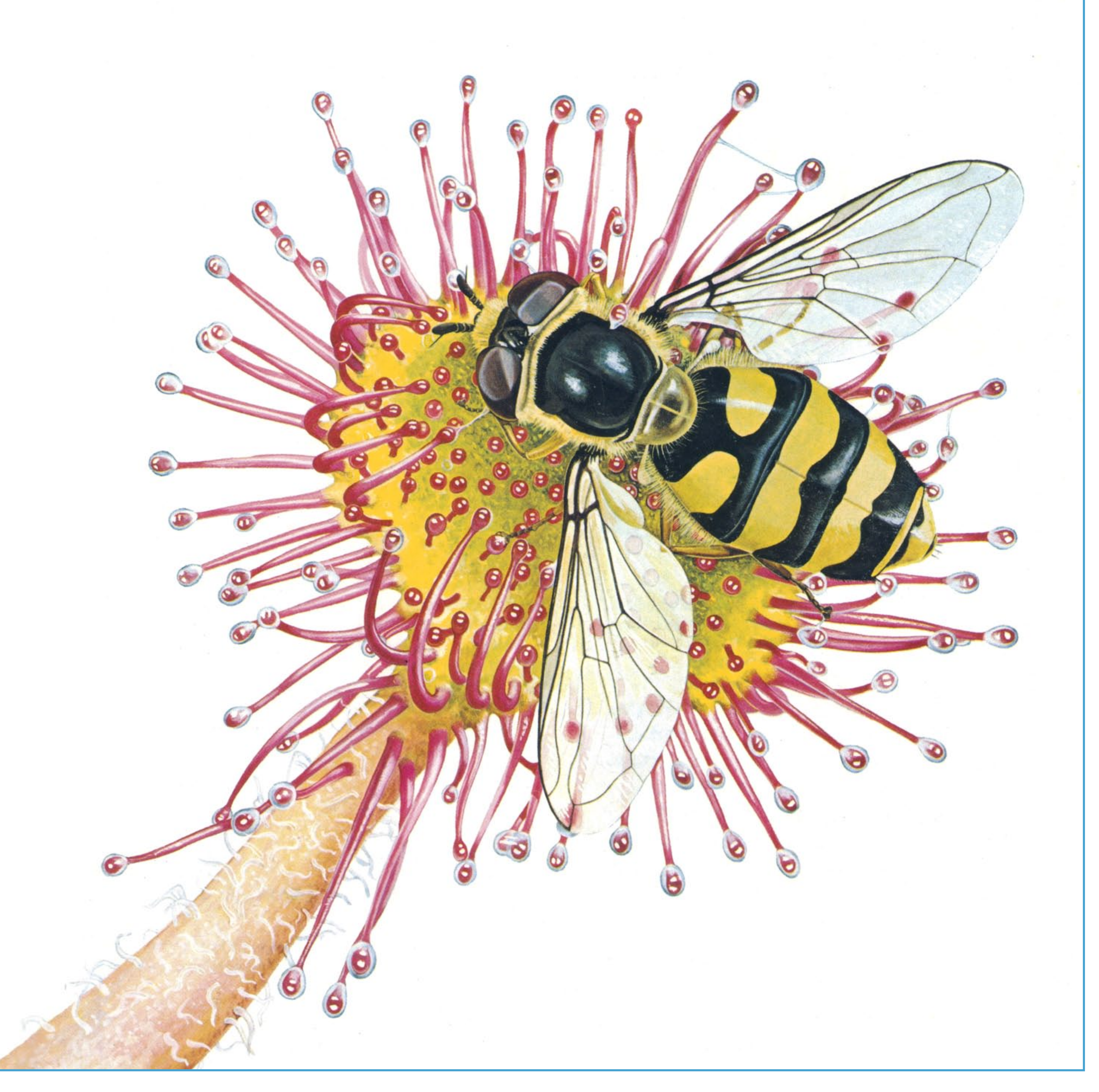
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



PLANTAS CARNIVORAS

Abril 1978

170 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 19
Abril 1978

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
M.ª Rosa Garcia Solé (Secretaria de Redacción)
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION Y PUBLICIDAD Pedro Clotas Cierco

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29
ESPAÑA

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Miquel Gich: *Yacimientos metálicos en la litosfera oceánica;* Antonio Creus: *Ensamblaje controlado por ordenador;* Monique Robert: *Microcircuitos del sistema nervioso;* Juana Iriarte: *Plantas carnívoras;* José Luis Rodríguez: *La genética del cáncer humano;* Marina Ramón: *Supergravedad y la unificación de las leyes de la física;* Gerardo Espinosa: *Sistemas pasivos de refrigeración en la arquitectura iraní;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:
Carlos Bas y Antoni Montserrat

Libros:

Carlos Martínez Shaw y Antoni Montserrat



LA PORTADA

La ilustración de la portada muestra un insecto atrapado por una de las distintas especies de plantas que aumentan su aporte de nutrientes mediante la digestión de organismos animales. La planta es la *Drosera rotundifolia.* Esta especie captura a su presa pasivamente; hay otras plantas carnívoras que son atrapadoras activas (véase "Plantas carnívoras", por Yolande Heslop-Harrison, página 56). Los pedúnculos que surgen de la superficie de la planta poseen filamentos de mucílago que retienen al insecto. El estímulo producido por contacto hace que los pedúnculos adyacentes pierdan su turgencia y se doblen hacia el insecto, sujetándolo con firmeza. Las glándulas secretoras de mucílago exudan enzimas digestivos y luego reabsorben los productos de la digestión. El insecto atrapado es el *Syrphus ribesii.*

Suscripciones:

Prensa Científica, S.A.
Departamento de suscripciones
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Distribución para España:

Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49
Barcelona-10 (España)

Distribución para los restantes países:

Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)

Precio de venta de este número:
España: 170 pesetas
Extranjero: 2 U.S. $

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 30 U.S. $

Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas

Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas.

Difusión controlada por OJD

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Dibujo de la portada de Carol Donner

Página	Fuente
5	National Aeronautics and Space Administration
6	Enrico Bonatti, Lamont-Doherty Geological Observatory (*arriba*); Jose Honnorez, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Universidad de Miami (*abajo*)
7-10	Adolph E. Brotman
11	R. D. Ballard (*arriba*), Bruce C. Heezen y Hank Chezar (*abajo*)
14-24	E. Herrera y A. Sellés
27	Ben Rose
28-34	George V. Kelvin
36	Ben Rose
38-40	George V. Kelvin
46	Joseph L. Price
47-50	Lorelle M. Raboni
51	Charles E. Ribak (*arriba*), Lorelle M. Raboni (*abajo*)
52	Lorelle M. Raboni (*arriba*), Gordon M. Shepherd (*abajo*)
53-54	Lorelle M. Raboni
57	Yolande Heslop-Harrison
58	Ilil Arbel
59	Yolande Heslop-Harrison
60	Yolande Heslop-Harrison (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
61	Ilil Arbel
62	Yolande Heslop-Harrison
63	Ilil Arbel
65	Yolande Heslop-Harrison
69	Carlo M. Croce e Hilary Koprowski (*izquierda*), Bunji Tagawa (*derecha*)
70	Carlo M. Croce e Hilary Koprowski
71-77	Bunji Tagawa
79-91	Gabor Kiss
93	Mehdi N. Bahadori
94-95	Alan D. Iselin
96	Mehdi N. Bahadori
97-99	Alan D. Iselin
100	Mehdi N. Bahadori
101	Alan D. Iselin
108-112	Michael Goodman

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Fort, S.A.
Rosellón, 33 - Barcelona-29
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda. Barcelona.

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

ENRICO BONATTI ("Yacimientos metálicos en la litosfera oceánica") es investigador asociado en el Lamont-Doherty Geological Observatory, de la Universidad de Columbia, y profesor adjunto de geología marina en la Universidad de Miami. Nació en Roma y cursó estudios en la Universidad de Pisa, en donde se doctoró en ciencias geológicas. En 1960 marchó a la Universidad de Yale con una beca Fulbright y trabajó en la reconstrucción climática de Europa meridional durante la última glaciación, analizando sedimentos procedentes de pequeños lagos italianos. Al año siguiente se interesó por la geología del fondo oceánico y se trasladó a la Scripps Institution of Oceanography, en donde permaneció hasta que, en 1965, pasó a la Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science de la Universidad de Miami. En 1975 se trasladó a Columbia, al observatorio antedicho.

EMILIO HERRERA ("Metabolismo intermediario durante el embarazo") es catedrático y director del departamento de fisiología general de la facultad de biología de la Universidad de Barcelona. En la actualidad ha sido propuesto para dirigir el Servicio de Investigación Bioquímica del Centro Especial "Ramón y Cajal", de la Seguridad Social. Trabajó como becario postdoctoral en la Harvard University Medical School, de Boston, y en la Northwestern University Medical School, de Chicago, como Visiting Professor en la Northwest Lipid Research Clinic de la Washington University, Seattle, y como investigador científico en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España. Su línea de investigación se centra en los mecanismos de regulación hormonal del metabolismo intermediario, utilizando para ello distintas situaciones experimentales, con especial atención a las interrelaciones "in vitro" e "in vivo" de carbohidratos y grasas en hipo e hipertiroidismo, diabetes, preñez, lactancia y ayuno, en la rata.

JAMES L. NEVINS y DANIEL E. WHITNEY ("Ensamblaje controlado por ordenador") son ingenieros de investigación en el laboratorio Charles Stark Draper, de Cambridge, Massachusetts. Nevins es jefe de investigación de un proyecto para el desarrollo de un sistema de ensamblaje industrial programable; dirige también la investigación de laboratorio en los sistemas de instrumentación y de control para reactores nucleares. Asistió a la Northeastern University, en donde se graduó en ingeniería eléctrica en 1952. Ese mismo año entró a trabajar en el laboratorio Draper como ingeniero de ensayo. En 1956 obtuvo su "master" por el MIT, en el departamento de aeronáutica. Whitney desempeña su cometido de ingeniero mecánico en el laboratorio Draper, desde 1974. Tras su etapa de formación en el MIT, y después de dos años en la marina, volvió para recibir su doctorado en ingeniería mecánica, en 1968.

GORDON M. SHEPHERD ("Microcircuitos del sistema nervioso") es profesor adjunto de fisiología en la facultad de medicina de la Universidad de Yale. Antes de graduarse, realizó estudios de zoología en la Universidad del estado de Iowa. Se doctoró en medicina por Harvard, en 1959. Posteriormente se trasladó a la Universidad de Oxford para trabajar en electrofisiología del sistema olfatorio. En ese mismo año se convirtió en colaborador-investigador de la rama de investigación matemática del National Institute of Arthritis, Metabolism and Digestive Diseases. Shepherd trabajó luego, durante dos años, en el departamento de fisiología del Instituto Carolino de Estocolmo, antes de incorporarse en Yale en 1967.

YOLANDE HESLOP-HARRISON ("Plantas carnívoras") es en la actualidad investigadora en la Welsh Plant Breeding Station del University College de Gales. Obtuvo su doctorado en botánica en la Universidad de Durham. Se graduó en la Universidad de Londres y realizó trabajos de investigación en los Reales Jardines Botánicos de Kew. Además de por las plantas carnívoras su interés se manifiesta también en el estudio de las vidas de los eminentes científicos victorianos a través de sus cartas y de otros materiales de archivo.

CARLO M. CROCE e HILARY KOPROWSKI ("La genética del cáncer humano") trabajan en el Wistar Institute of Anatomy and Biology de Filadelfia. Croce, que es profesor de genética, estudió en la Universidad de Roma, en donde se doctoró en 1969. Al siguiente año se sumó al grupo de trabajo del Wistar Institute, centrando su investigación en los factores que controlan la expresión génica y en la genética de las neoplasias. Koprowski dirige el Wistar Institute y enseña también en la Universidad de Pennsylvania. Se doctoró en medicina por la Universidad de Varsovia en 1939, y llegó a los Estados Unidos en 1944. Después de pasar 12 años en los Lederle Laboratories, de la American Cyanamid Company, entró en el instituto. Su campo de investigación actual lo constituye la expresión de las funciones inmunológicas por parte de las células híbridas y en los mecanismos de latencia viral en las infecciones crónicas y persistentes.

DANIEL Z. FREEDMAN y PETER VAN NIEUWENHUIZEN ("Supergravedad y la unificación de las leyes de la física") son miembros de la facultad de físicas de la Universidad del estado de New York en Stony Brook. Freedman asistió a la Universidad de Wesleyan y a la de Wisconsin, y en ésta se recibió de doctor en 1964. Permaneció durante los cuatro años siguientes en el Imperial College of Science and Technology, de la Universidad de California en Berkeley, y en el Institute for Advanced Study, de Princeton. En 1968 entró en el claustro docente de Stony Brook. Van Nieuwenhuizen estudió en la Universidad de Utrecht, donde recibió su doctorado en matemáticas y física teórica bajo la supervisión de Martin J. G. Veltman. De 1969 a 1971 fue becario de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), trasladándose posteriormente a la Universidad de París en Orsay. En 1973 pasó a la Universidad de Brandeis, y, dos años más tarde, se integró en Stony Brook (New York).

MEHDI N. BAHADORI ("Sistemas pasivos de refrigeración en la arquitectura iraní") enseña ingeniería mecánica en el Centro de Energía Solar, que también dirige, de la Universidad Pahlavi, de Irán. Nos comunica: "Me gustaría agradecer al Consejo de Investigación de la Universidad Pahlavi por haberme subvencionado el estudio, así como a las delegaciones de cultura de las ciudades de Yazd, Kerman y Bam por haberme facilitado el acceso a aquellos edificios de interés en mi trabajo. Estoy en deuda también por otros y parecidos servicios con S.H. Izadpanah y los profesores Sabzevari y Shahinpoor".

Yacimientos metálicos en la litosfera oceánica

Los procesos geoquímicos formadores de minerales ricos en metales están en gran parte localizados en las dorsales centrooceánicas, es decir, en los "centros de expansión" en donde las placas de la corteza terrestre reciben la adición de nuevos materiales

Enrico Bonatti

Durante siglos, el hombre ha buscado yacimientos de minerales metálicos en la corteza terrestre; para su localización se ha ayudado casi exclusivamente de experiencias anteriores. Uno de los resultados de la reciente revolución en la comprensión de la tierra por el hombre, que queda sintetizada perfectamente en la teoría de la tectónica de placas, es la constatación, cada día más firme, de que la mayoría de los yacimientos minerales metálicos se originan en virtud de la intensa actividad fisicoquímica que tiene lugar en los bordes existentes entre las inmensas placas en que se divide la litosfera, que es la envoltura más externa de la tierra. El proceso puede estudiarse allí donde se está produciendo en la actualidad; y ello se da a lo largo de los bordes de placa activos existentes en el fondo oceánico. Si este proceso ocurrió en bordes antiguos que ahora están en tierra firme, se encuentran ya en ellos yacimientos minerales de dimensiones explotables, o bien pueden buscarse con garantías razonables de éxito.

La esencia de la revolución geológica radica en considerar a la tierra como dinámica en vez de entenderla como algo estático. Las placas litosféricas (que se reparten la litosfera entre doce principales y otras varias secundarias) se mueven a modo de balsas sobre las rocas de la astenosfera, que son más densas y fluidas y se hallan a una temperatura más elevada. La actividad en los bordes entre placas depende del tipo de borde. Si éste es divergente, se separan dos placas debido a la ascensión de magma, fluido y a elevada temperatura, que procede del manto; el magma forma nueva corteza, la cual se enfría y se mueve hacia fuera en ambas direcciones. Un eje de expansión de este tipo es el lugar donde pueden precipitar metales. Pero si el borde es convergente, las dos placas se reúnen; en una zona de subducción, una placa se hunde por debajo de la otra y vuelve a la astenosfera caliente; en una región de colisión total, hay partes de la corteza que cabalgan y se elevan convirtiéndose en cordilleras montañosas. Cuando los bordes son paralelos, las placas se mueven lateralmente. También se generan importantes yacimientos metálicos en aquellos bordes de placa que son convergentes y paralelos.

En la mayor parte de este artículo me referiré a los yacimientos metálicos que se producen en los centros de expansión. Algunos yacimientos se forman bajo el fondo oceánico, dentro de la corteza y el manto superior, mientras que otros se originan sobre ese mismo fondo. Algunos reciben el nombre de hidrotermales. Las razones de ello se examinarán más adelante. Antes, sin embargo, nos servirá de gran ayuda, para centrarnos en el tema, describir otros dos tipos de precipitación metálica sobre el fondo oceánico, a saber: la hidrogénica y la diagenética.

El término hidrogénico proviene del griego y significa originado a partir del agua. Los yacimientos hidrogénicos se forman por acumulación lenta, sobre el fondo oceánico, de elementos metálicos procedentes del agua del mar. Esta posee cantidades de metales en solución, que, aunque pequeñas, tienen gran importancia; sirven de ejemplo el hierro y el manganeso, que se encuentran en concentraciones inferiores a una parte por millón en peso. Los metales llegan al mar acarreados, en parte, por los ríos; éstos los han ido incorporando, a su vez, a raíz de la meteorización y la descomposición de las rocas continentales.

El hierro, el manganeso y la mayoría de los restantes elementos metálicos tienen una solubilidad muy limitada en un medio alcalino y oxidado como es el agua de mar; por tanto, tienden a separarse fácilmente de ella, separación que ocurre, principalmente, a través de reacciones inorgánicas por las que el hierro y el manganeso disueltos son oxidados (por oxígeno disuelto en el agua marina), formando óxidos e hidróxidos insolubles de hierro y manganeso, si se trata de estos dos metales. Separados de esta forma, los metales se depositan en el fondo oceánico a modo de diminutas partículas (de unos pocos micrones de diámetro) o como películas y costras sobre cualquier tipo de material sólido que aflore en el suelo del mar. Ciertos metales pueden también ser separados del agua marina por organismos vivientes, tanto planctónicos (es decir, que flotan libremente) como bentónicos (esto es, que viven en el fondo). Al morir estos organismos, los metales quedan liberados en la interfase agua-sedimento, desde donde pueden pasar a incorporarse a los sedimentos.

Todos estos procesos son lentos. La velocidad de crecimiento de los yacimientos hidrogénicos, que se calcula a partir de la desintegración de los elementos radiactivos contenidos en ellos, puede ser del orden de un milímetro, o me-

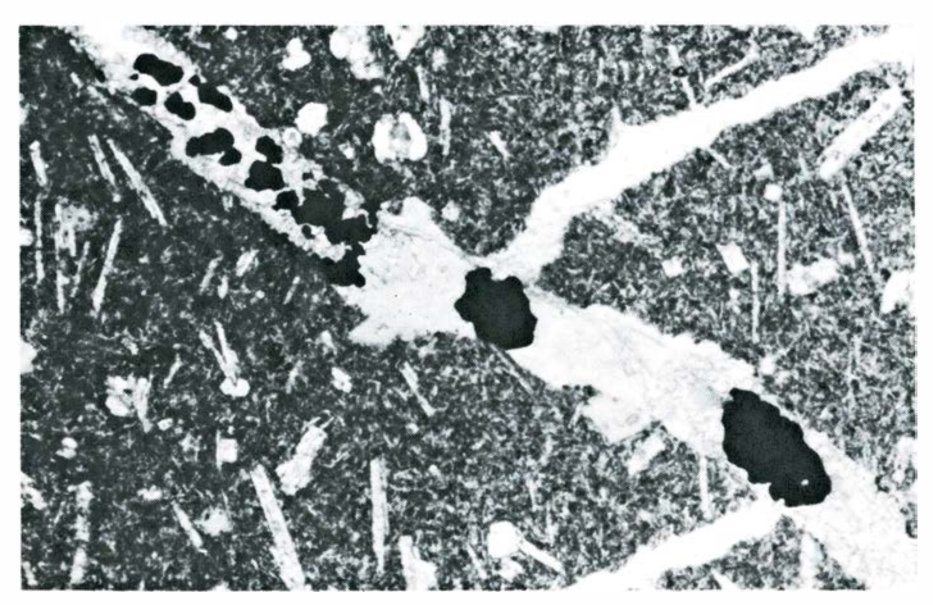
LOS APENINOS DE ITALIA aparecen en la página opuesta en una fotografía realizada desde un satélite Landsat. En ellos se encuentran numerosos afloramientos de la antigua litosfera oceánica conocidos con el nombre de ofiolitas, la mayoría de las cuales son ricas en metales. A finales del Mesozoico, hace unos 100 millones de años, la región formaba parte de un fondo oceánico próximo a un centro de expansión, o lugar donde se genera corteza nueva. Entre los metales concentrados allí gracias a diversos mecanismos tenemos el óxido de manganeso y el sulfuro de cobre y hierro. La nueva corteza se separó lentamente del centro de expansión. Con el tiempo, al colisionar con otra de las placas terrestres, se levantó hasta su posición actual debido a fallas cabalgantes.



nos, cada 1000 años. Los yacimientos hidrogénicos, entre los que se cuentan la mayoría de concreciones del fondo oceánico conocidas por nódulos de manganeso, se encuentran particularmente bien desarrollados en aquellas regiones de las cuencas oceánicas que reciben un aporte mínimo de materiales procedentes de las tierras emergidas. Entre los ejemplos que se pueden aducir, se citan las plataformas abisales alejadas de los continentes y determinadas zonas del fondo oceánico, como las elevaciones submarinas ("seamounts") y los bancos aislados y profundos. En otras partes, la dilución producida por la sedimentación detrítica (la caída constante sobre el fondo marino de arcilla y de otras partículas minerales procedentes de tierra firme) evita que los metales se acumulen y den yacimientos concentrados.



MINERALES DE MANGANESO Y HIERRO extraídos del Océano Indico occidental en 1976 por el buque de investigación *Vema,* al servicio del Lamont-Doherty Geological Observatory. En esta muestra cortada y pulida, el metal gris es óxido de manganeso y el de color rojizo hidróxido de hierro. El yacimiento se encontró a una profundidad de 4000 metros en una zona de fractura próxima al eje de la Dorsal del Indico, que es un centro de expansión. Se trata de un yacimiento hidrotermal: sus metales proceden del lavado del basalto cortical por circulación del agua del mar, habiendo atravesado el fondo oceánico en una surgencia termal. Cuando una solución de este tipo entra en contacto con el agua oxigenada y fría del fondo del mar, los metales como el hierro y el manganeso tienden a oxidarse y precipitar. El hierro y el manganeso se separan debido a que, en el agua del mar, el primero es menos soluble que el segundo y, por tanto, puede precipitar antes.



SULFUROS METALICOS en un basalto alterado, dragado, del fondo del Atlántico cerca de la Dorsal centroatlántica. En esta microfotografía, los sulfuros son las manchas negras que se aprecian dentro de la vena clara que atraviesa el basalto en diagonal. Abundan, sobre todo, calcopirita (sulfuro de cobre y hierro) y pirita (sulfuro de hierro). Los sulfuros, igual que el manganeso y el hierro que se observan en la foto superior de esta misma página, se originaron gracias a sistemas hidrotermales. El agua de mar que circulaba en profundidad en la corteza terrestre, próxima a la dorsal (que es un centro de expansión), se enriqueció en metales y azufre procedentes del basalto. La combinación del azufre con determinados metales originó minerales insolubles que precipitaron por debajo del fondo oceánico. La presente microfotografía se ha incrementado en 45 diámetros.

Otra fuente que origina yacimientos metálicos en los fondos oceánicos es el agua existente entre los intersticios del sedimento. Estos yacimientos reciben el nombre de diagenéticos. El término deriva de la palabra diagénesis, que define todas las reacciones fisicoquímicas (compactación y recristalización incluidas) que se dan en un sedimento una vez depositado. Los yacimientos diagenéticos se forman en las zonas del fondo oceánico en donde se incorporan al sedimento notables cantidades de materia orgánica. Tales zonas suelen ubicarse bajo masas de agua con vida abundante.

La oxidación y descomposición graduales de la materia orgánica del sedimento empobrecen en oxígeno disuelto el agua existente en los intersticios y crean unas condiciones reductoras hasta cierto nivel por debajo del fondo marino. Cuando las partículas de hierro y manganeso que se formaron hidrogénicamente llegan a ese nivel, se disuelven conforme se van enterrando gradualmente en el sedimento. El hierro y el manganeso pasan a tener entonces concentraciones muy elevadas en la solución existente entre los intersticios del sedimento. Luego, muestran una tendencia a migrar hacia arriba, sobre todo por difusión, volviendo a la zona oxidada del sedimento; allí precipitan de nuevo en forma de partículas sólidas.

Así pues, el límite entre la zona oxidada y la zona reducida actúa en realidad de filtro para determinados metales; a consecuencia de lo cual se concentran justamente por encima de dicho límite. Cuando éste se halla cerca de la interfase sedimento-agua, las concreciones y las costras metálicas pueden formarse sobre el fondo oceánico en virtud de ese proceso. Los yacimientos diagenéticos tienen una composición distinta de la que evidencian los hidrogénicos. Por ejemplo, la relación hierro/manganeso es menor. El hierro es menos móvil que el manganeso en sedimentos reducidos, lo cual se debe, en parte, a que puede separarse fácilmente de la solución por combinación con el azufre para dar partículas de sulfuro de hierro.

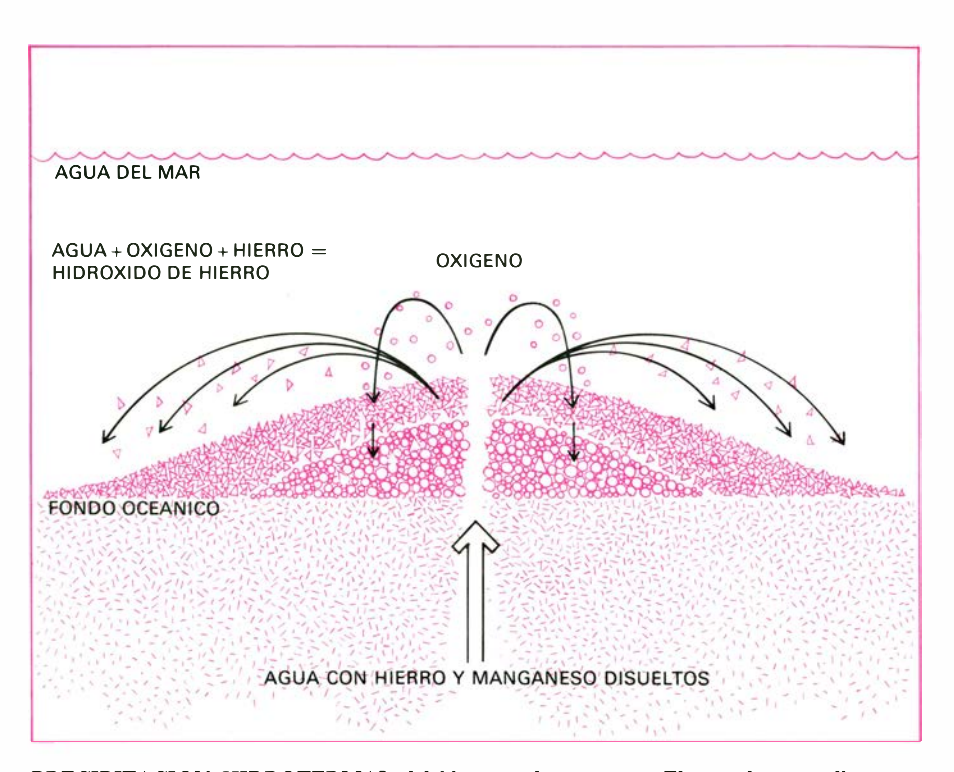
Volviendo a los yacimientos hidrotermales, podemos afirmar que están asociados a las zonas activas del fondo oceánico en donde, según la teoría de la tectónica de placas, se forma litosfera nueva. Estos centros de expansión, que son zonas de intensa actividad sísmica y volcánica, suelen corresponderse con

los ejes de la dorsal que discurre aproximadamente por la parte central de una cuenca oceánica. Los procesos que condujeron a la formación de concentraciones metálicas a lo largo de los centros de expansión oceánicos han despertado un interés considerable en los últimos años.

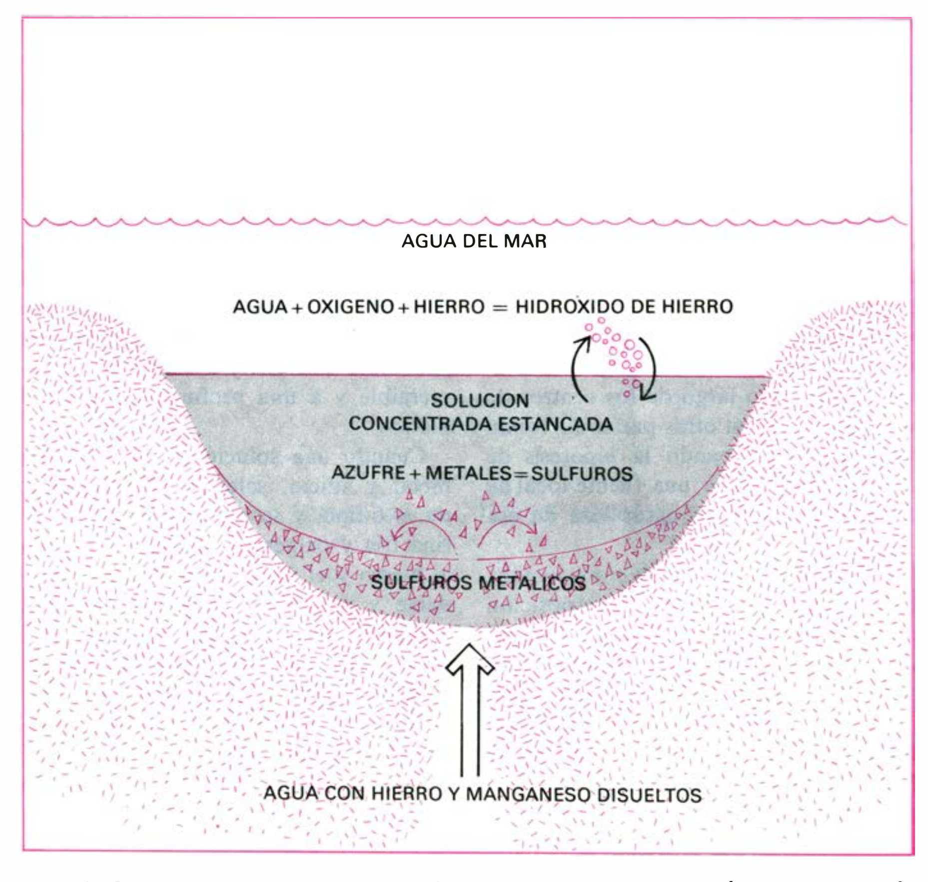
A mediados de la década 1960-70, varios investigadores que trabajaban por separado dieron cuenta del hallazgo de anomalías geoquímicas en extensas zonas del fondo oceánico, centradas a lo largo del eje de la Dorsal del Pacífico oriental situada en la parte sudoeste del Océano Pacífico. Kurt G. V. Boström, del Instituto de Ciencias del Mar de la Universidad de Miami, e I. S. Skornyakova, del Instituto de Oceanografía de la Unión Soviética, encontraron concentraciones anormalmente elevadas de hierro y manganeso en los sedimentos de tales zonas. Gustaf O. Arrhenius, de la Scripps Institution of Oceanography, y yo mismo habíamos descubierto en la misma región bario, en concentraciones inusitadamente elevadas, en forma del mineral barita. En el Instituto de Ciencias del Mar, Oiva I. Joensuu y yo mismo estudiamos muestras de yacimientos poco corrientes, obtenidas exactamente en la cresta de la Dorsal del Pacífico oriental, que contenían más del 30 por ciento de hierro en peso.

Todos estos investigadores reconocieron entonces que sus descubrimientos no podían explicarse apelando a la sedimentación detrítica o a la precipitación química a partir de agua marina normal. Estuvieron de acuerdo en que se requería una fuente local de metales para explicar los yacimientos. Sugirieron que tal fuente podía estar relacionada con la actividad volcánica o hidrotermal (quizá con las dos), centrada en el eje de la dorsal. Desde entonces, el origen, composición y distribución de este tipo de yacimientos se ha clarificado de forma notable.

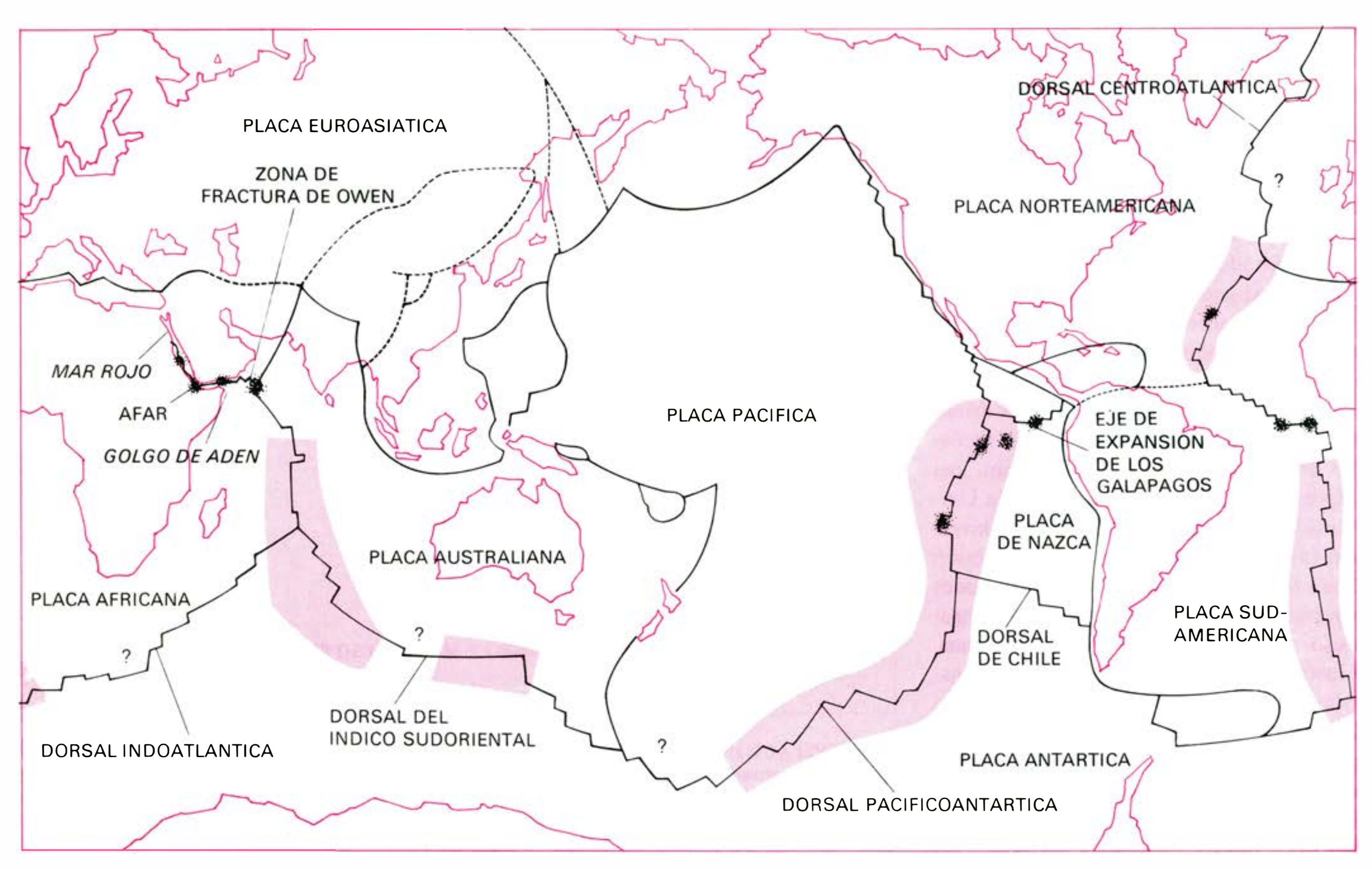
Se han encontrado yacimientos de este tipo aflorando en fondos oceánicos recientes, a lo largo de los centros de expansión activos, de los principales mares y de las regiones que se están convirtiendo en oceánicas, como el Mar Rojo, el Afar y el Golfo de Adén. Los sondeos profundos con fines de investigación realizados por el buque *Glomar Challenger* han revelado la existencia de yacimientos idénticos a los citados en fondos oceánicos más antiguos, alejados de los actuales centros de expansión, a modo de capa enterrada en la base de la columna sedimentaria. La capa u horizonte se encuentra justo por encima de la



PRECIPITACION HIDROTERMAL del hierro y el manganeso. El agua de mar caliente que circula por convección desde las rocas basálticas profundas de la corteza, donde puede penetrar y circular puesto que la roca está fracturada, emerge por el fondo oceánico a través de un conducto localizado en un centro de expansión. El agua lleva en solución iones de hierro y manganeso procedentes del lavado del basalto. En el agua oxigenada y fría del fondo oceánico, los metales se oxidan y precipitan en forma de óxidos de manganeso *(triángulos)* y de hidróxidos de hierro *(círculos)*.



UNA SOLUCION CONCENTRADA Y ESTANCADA sobre el fondo oceánico aporta también las condiciones necesarias para la formación de yacimientos metálicos. Este estancamiento puede darse si la solución rica en metales que ha circulado por la corteza se descarga, a través del fondo oceánico, en un entorno topográfico que impida la mezcla de la solución con el agua de mar. En ausencia de oxígeno, la concentración de la solución favorece la combinación del hierro, cobre, cinc y plomo con el azufre para dar origen a compuestos sulfurosos insolubles. Los minerales sulfurosos precipitan entonces sobre el fondo marino para dar origen a nuevos yacimientos metálicos.



LOS SEDIMENTOS ricos en metales se presentan a lo largo de los centros de expansión de las dorsales centrooceánicas. En las zonas sombreadas, los sedimentos tienen una concentración anormalmente alta en ciertos metales: hierro, manganeso, bario, cobre y uranio. En las zonas señaladas por nube de puntos se han descubierto yacimientos metálicos. Los interrogantes indican posibles sedimentos ricos en metales.

corteza basáltica que caracteriza a las cuencas oceánicas.

Esta distribución sugiere que los procesos responsables de la formación de yacimientos metálicos en los centros de expansión actuales operaron igualmente a lo largo de la historia remota de los principales océanos. Se ha visto que la velocidad de precipitación del hierro, manganeso y otros metales es varias veces mayor, a lo largo de los centros de expansión, que en otras partes del fondo oceánico, confirmando la hipótesis de que allí debe existir una fuente local de metales. ¿Cuál es la naturaleza de esa fuente?

La formación de yacimientos metálicos, similares en cuanto a composición a los existentes en las dorsales oceánicas, ha sido observada directamente en aguas someras en distintas zonas volcánicas: cerca de la isla de Thera, en el Mediterráneo, en las proximidades de Matupi Harbor, en el Pacífico occidental y en el volcán submarino Bunu Wuhu, en Indonesia. En cada uno de estos lugares se vio que los yacimientos se originaban por precipitación de metales a partir de soluciones, ricas en sílice y metal, que salían del fondo oceánico debido a surgencias hidrotermales.

Esta serie de pruebas, y otras, sugieren que los metales son suministrados a lo largo de los centros de expansión oceánicos merced a la descarga de surgencias termales. En efecto, recientemente se han observado surgencias hidrotermales activas en el centro de expansión de los Galápagos, en el Pacífico ecuatorial oriental, por grupos de la Woods Hole Oceanographic Institution y de la Oregon State University a bordo de un sumergible y a una profundidad de 2500 metros.

Cuando una solución termal, rica en metal y silicio, sale de una surgencia de este tipo, y se mezcla con agua marina fría y oxigenada, los metales como el hierro y el manganeso tienden a oxidarse y precipitar. El hierro tiende a precipitar antes que el manganeso, por ser menos soluble en el agua de mar. La sílice también precipita, ya que su solubilidad disminuye bruscamente al descender la temperatura.

Los yacimientos hidrotermales de origen químico presentan notorias diferencias con respecto a los yacimientos hidrogénicos. Estos últimos contienen hierro y manganeso en cantidades aproximadamente iguales, mientras que la relación entre estos dos metales registra valores muy distintos en los primeros. Algunos yacimientos de la Dorsal centroatlántica contienen más del 35 por ciento de manganeso y menos del 1 por ciento de hierro, en tanto que en otros yacimientos (de la Dorsal del Pacífico oriental) se invierte la proporción de los dos metales. Se han dragado igualmente muestras que consisten en un horizonte rico en hierro, cubierto por otro horizonte rico en manganeso. Los metales tienden a separarse porque uno reacciona con mayor lentitud que el otro en determinados procesos químicos, como la oxidación (el hierro tiende a oxidarse a una velocidad mayor que el manganeso). A la oxidación sigue la precipitación, que se produce, por tanto, a velocidades distintas para uno y otro metal.

Otra diferencia entre los yacimientos hidrotermales y los hidrogénicos estriba en que la concentración de los metales traza (níquel, cobre, cobalto, plomo, cinc, etcétera) es menor en los primeros, aunque resulta más elevada en ellos que en los sedimentos oceánicos normales. La relativamente elevada velocidad de precipitación de los yacimientos hidrotermales puede explicar su bajo contenido en metales traza, si se supone que éstos son en gran parte barridos del agua de mar por las partículas de óxido e hidróxido de hierro y manganeso. Cuanto

más tiempo estas partículas estén en contacto con el agua (es decir, cuanto menor sea su velocidad de sedimentación) mayor posibilidad tendrán de incorporar metales traza y otros elementos, como fósforo y uranio, por adsorción. Así es como los metales traza entran a formar parte de los yacimientos. La concentración elevada de metales traza, en particular cobalto y cobre, en yacimientos hidrogénicos de profundidad, es lo que hace que puedan ser muy apreciados económicamente.

Las soluciones hidrotermales pueden contener, asimismo, algunos metales traza, cobre y cinc por ejemplo, que luego descargan en el fondo marino junto con el hierro y el manganeso. Pueden llegar a concentrarse en yacimientos constituidos en la vecindad de las surgencias termales, sólo cuando su incorporación tiene lugar bajo unas condiciones topográficas e hidrológicas que propician la formación, en el fondo oceánico, de zonas con agua estancada y reducida con una alta concentración iónica. La falta de oxígeno en un ambiente reducido impide la oxidación de los metales y favorece la combinación del cobre y del cinc con el azufre para formar sulfuros. Estas condiciones se dan en los yacimientos del Mar Rojo (donde la concentración de cobre y cinc llega a ser de varias unidades por ciento, haciendo que los yacimientos sean de interés económico); no ocurre lo propio en la mayoría de los que se encuentran en las dorsales centrooceánicas, donde las aguas del fondo están oxidadas y no pueden formarse sulfuros por encima del fondo oceánico.

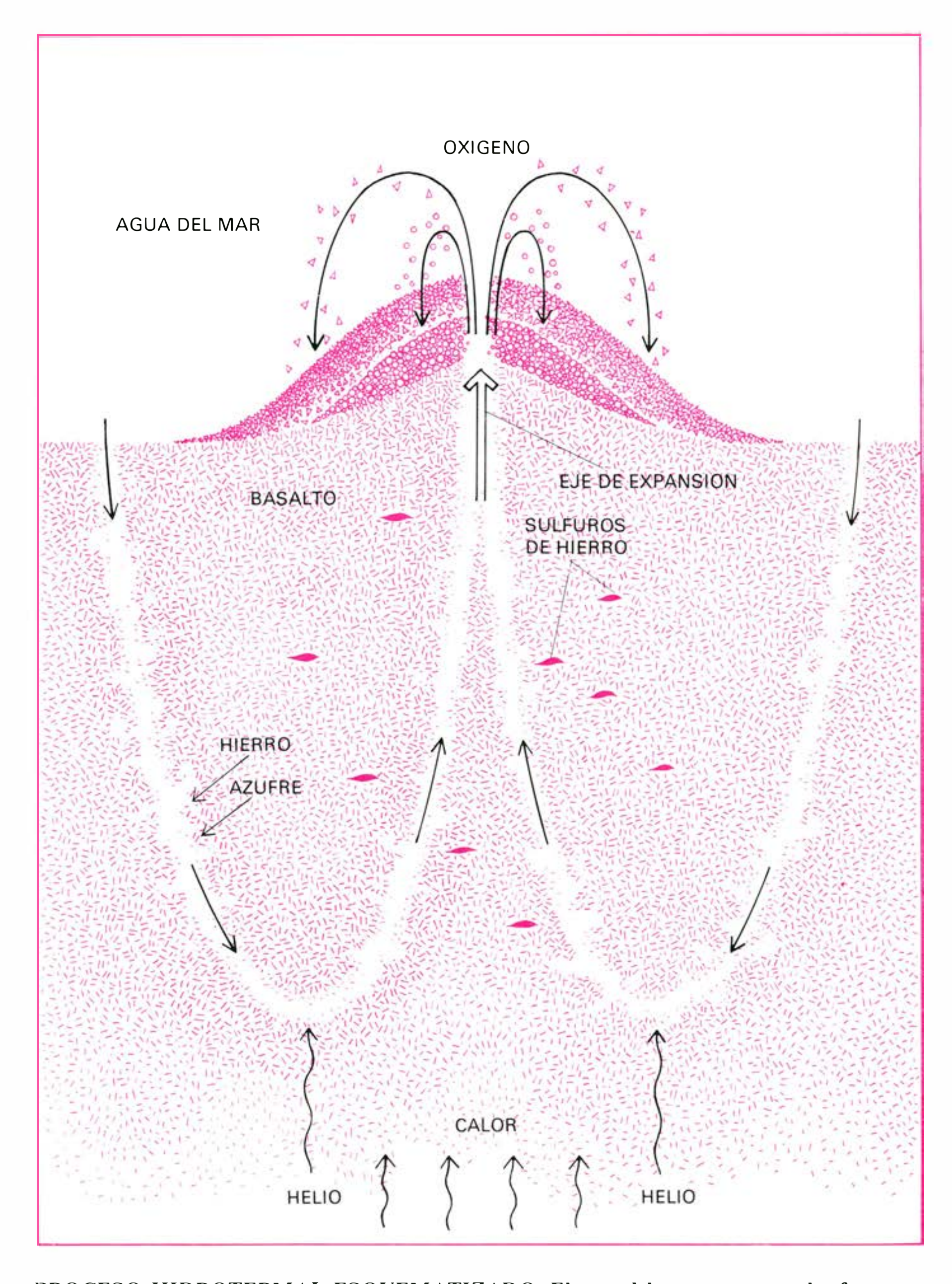
La geoquímica de los elementos denominados tierras raras nos proporciona otra base para distinguir entre los yacimientos hidrotermales y los hidrogénicos. Las tierras raras son un grupo de 15 elementos (cuyo número atómico se halla entre 57 y 71) que tienen un comportamiento químico notablemente similar, por lo cual durante la mayor parte de su ciclo geoquímico en tierra firme tienden a no separarse.

El cerio es una de las tierras raras que, bajo ciertas condiciones, puede comportarse de forma algo independiente, debido a que su valencia química puede cambiar. El cerio, que es la única tierra rara trivalente, puede oxidarse pasando a ser tetravalente y relativamente insoluble. Razón por la cual el agua del mar pierde antes cerio que cualquier otra tierra rara. El cerio pasa a incorporarse a los yacimientos hidrogénicos en lento desarrollo.

Los yacimientos hidrotermales presentan un empobrecimiento en cerio característico, parecido al del agua del mar, y una concentración total de tierras raras substancialmente inferior a la correspondiente a los yacimientos hidrogénicos. Estos datos sugieren que los yacimientos hidrotermales pueden captar, del agua del mar, las tierras raras, si bien de forma limitada porque los tales depósitos presentan una acreción muy rápida. Se han encontrado algunos yacimientos hidrotermales metálicos con una distribución de tierras raras similar a la de los basaltos oceánicos, lo cual pone de manifiesto que la corteza oceánica basáltica es fuente, por lo menos, de algunos de los elementos contenidos en los yacimientos metálicos de los centros de expansión.

De lo acabado de exponer surgen dos cuestiones: ¿de dónde proceden las soluciones termales que se incorporan al mar en los centros de expansión? y ¿cuál es la procedencia de los metales que llevan consigo? Para contestar estas preguntas es necesario hacer una pequeña digresión.

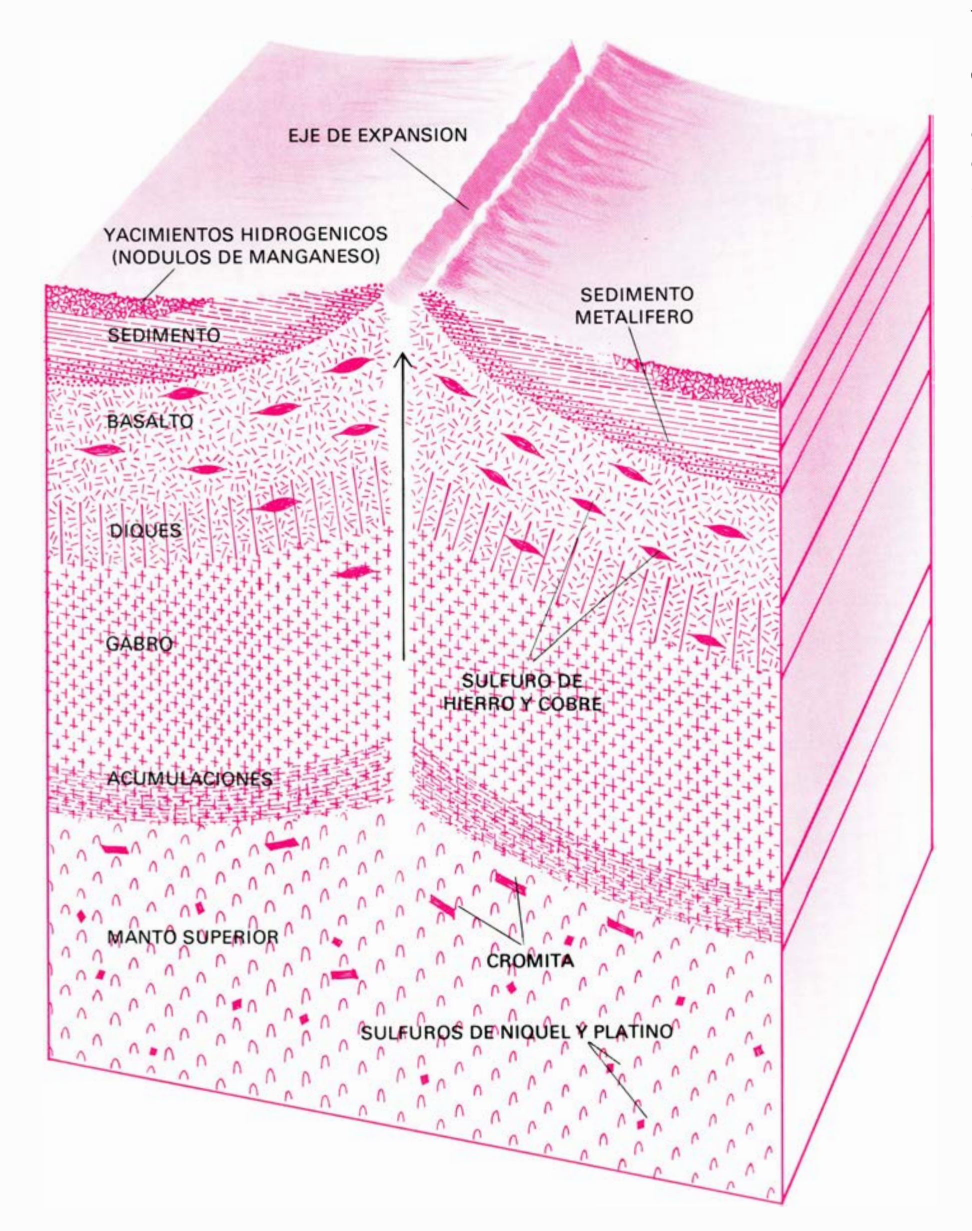
Según la teoría de la tectónica de placas, una placa litosférica se enfría lenta-



PROCESO HIDROTERMAL ESQUEMATIZADO. El agua del mar penetra por las fracturas del basalto de la corteza que se halla cerca de un centro de expansión, y lo hace hasta una profundidad de varios kilómetros. Habida cuenta de las altas temperaturas reinantes en la zona de inyección de magma a lo largo de un centro de expansión, el agua se calienta hasta una temperatura de varios centenares de grados centígrados. El agua caliente extrae varios elementos (entre los que hay metales) del basalto, perdiendo también algunos ella misma. La convección térmica hace circular de nuevo el agua así enriquecida hacia el fondo oceánico; allí se descarga a través de surgencias termales. Algunos metales precipitan en forma de sulfuros dentro de la corteza. Los metales que permanecen en solución precipitan en el fondo marino. La presencia de helio procedente del manto a lo largo de los centros sugiere que los sistemas hidrotermales llevan gases.

mente a medida que se aleja de la zona axial de origen. Conociendo su temperatura inicial en el eje de origen (unos 1000 grados centígrados), su espesor y su composición media, se puede calcular la pérdida de calor por conducción vertical de la placa en proceso de envejecimiento. La curva obtenida a partir de este cálculo se ajusta bien a los valores reales del flujo de calor medidos en el fondo oceánico, con excepción de los correspondientes a la litosfera reciente que se halla próxima a los ejes de expansión. En estas zonas, los valores medidos del flujo de calor presentan una notable variación y son siempre substancialmente inferiores a la curva teórica.

La discrepancia puede explicarse si se supone que cerca del eje de la dorsal se pierde buena parte del calor, no por conducción sino por convección, es decir, por el flujo establecido debido a la tendencia de un fluido caliente a ascender y a la de un fluido frío a hundirse. La pérdida por convección se produciría donde el agua marina penetrara en la corteza oceánica en el interior de la zona intensamente fracturada y carente de sedimentos inmediata a un eje de expansión.



DISTRIBUCION DE YACIMIENTOS METALICOS en las unidades de la litosfera oceánica. Los yacimientos metálicos hidrogénicos, tales como los formados por nódulos de manganeso, se encuentran en el techo del horizonte sedimentario. Los sistemas hidrotermales cercanos al eje de expansión dan lugar a yacimientos sedimentarios metálicos en la base del horizonte sedimentario y a sulfuros metálicos dentro de la parte superior (basáltica) de la corteza. Los yacimientos de cromita pueden formarse en la base de la corteza dentro de acumulaciones gabroides y de rocas ultrabásicas, y, especialmente, en el interior del manto superior por segregación a partir de bolsas de magma, creadas por fusión parcial de rocas ultramáficas que están situadas muy por debajo del eje de expansión. En el manto superior pueden generarse concentraciones de sulfuros de platino y níquel a partir de bolsas magmáticas, según se aprecia en la ilustración. Una distribución parecida se encuentra en los fragmentos levantados pertenecientes a litosfera oceánica antigua.

La permeabilidad de la corteza oceánica reciente es tal que el agua de mar puede llegar probablemente hasta varios kilómetros por debajo del fondo oceánico. En esta zona caliente, donde el magma del eje asciende, el agua se calienta y es conducida de nuevo hacia arriba por convección, emergiendo del fondo marino en las surgencias termales.

Cabe preguntarse a continuación qué ocurre durante este proceso para transformar un líquido como el agua de mar, dotado de una concentración sumamente baja en metales, en una solución muy enriquecida en ellos y cuya composición química es completamente diferente. La circulación del agua marina que he descrito tiene lugar, sobre todo, entre rocas de composición basáltica. Por tanto, es posible que los cambios químicos observados se deban a reacciones químicas originadas entre las rocas basálticas y el agua de mar calentada. Estas reacciones han sido objeto de estudio en el laboratorio por varios geoquímicos. Se somete a reacción el agua de mar y muestras de basalto molidas bajo determinadas condiciones de presión y temperatura durante períodos de tiempo que van de horas a años.

En estas reacciones se produce un intercambio considerable de elementos, especialmente en las que tienen lugar a temperaturas de varios cientos de grados centígrados. El agua de mar pasa de ser una solución oxidada y ligeramente alcalina (su condición normal) a una solución ácida y reducida, muy enriquecida en sílice, calcio, hierro, manganeso, cobre y otros elementos, todos los cuales se han disuelto a partir del basalto. Por otra parte, el agua de mar pierde determinados elementos, el magnesio por ejemplo, que se incorporan a la roca. La composición de las soluciones resultantes de estos experimentos es muy similar a la de las soluciones que surgen de los sistemas hidrotermales desarrollados en terrenos basálticos.

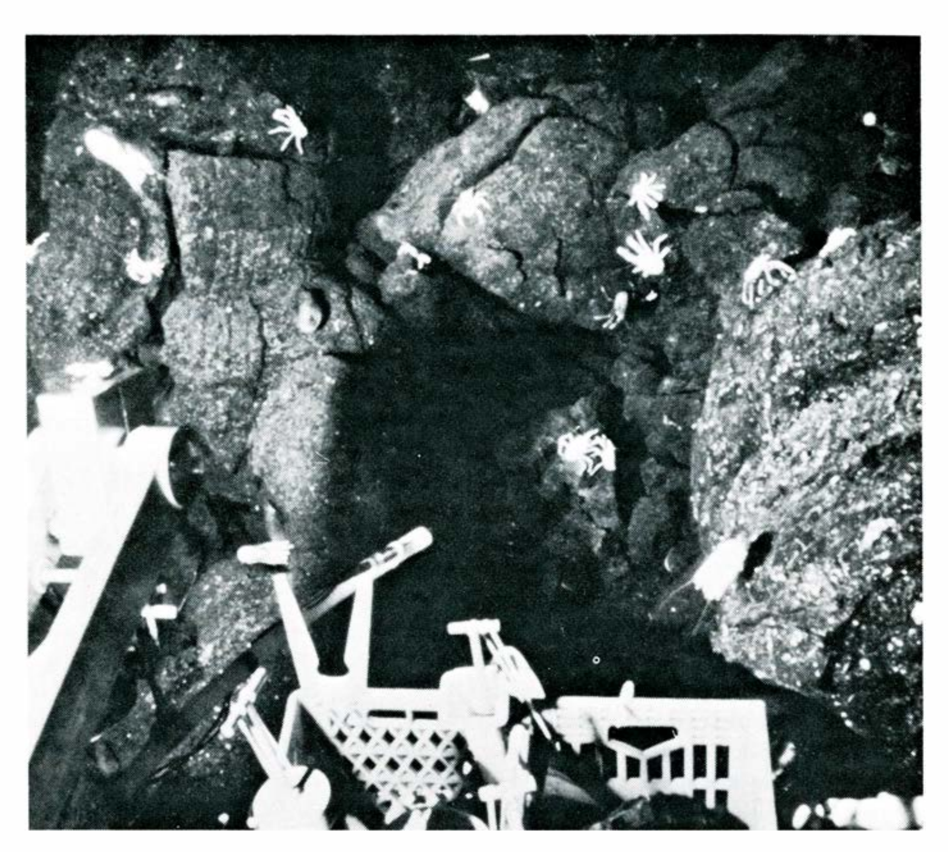
Un enfoque complementario del mismo problema consiste en comparar basalto oceánico reciente con basalto oceánico alterado por acción del agua del mar. Entre ambos tipos de basalto se observan grandes diferencias químicas. De nuevo nos encontramos con que, entre los distintos elementos, son los metales los que han visto decrecida su concentración en los basaltos alterados. Así pues, hay varios tipos de argumentos que apoyan la idea de que las reacciones entre agua de mar caliente y basalto, producidas por debajo del

fondo oceánico, son las que suministran primordialmente los metales a los yacimientos asociados a las dorsales oceánicas que son, o han sido, centros de expansión.

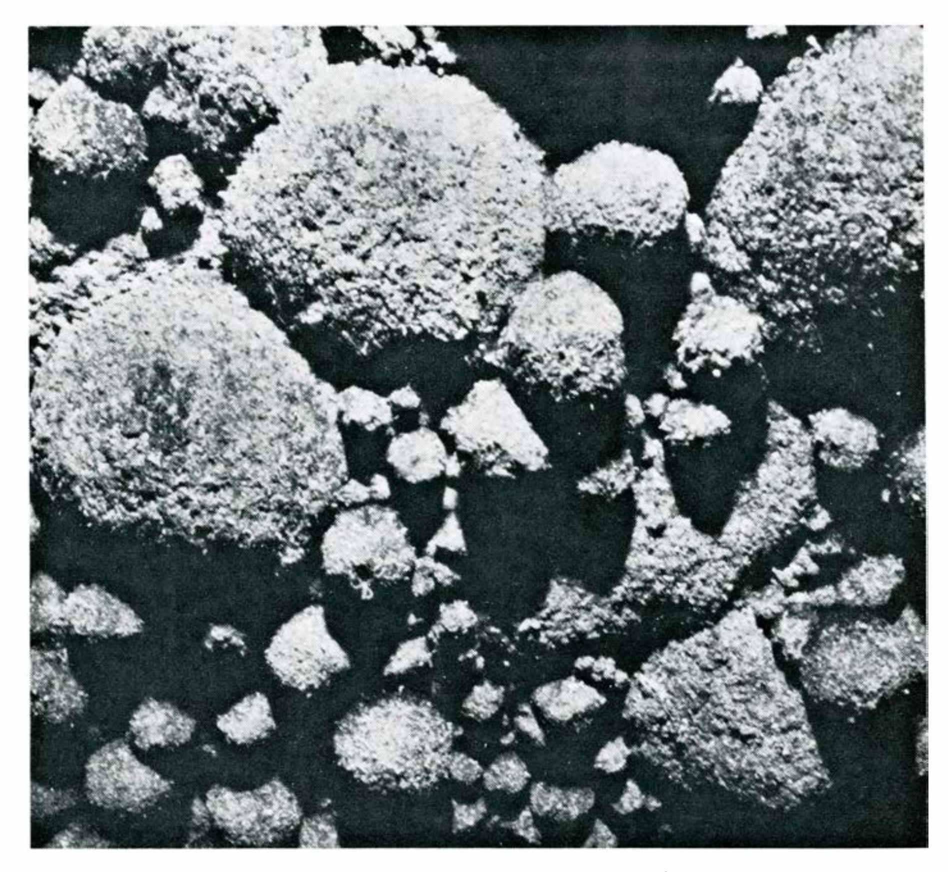
A modo de avance, podemos presentar un modelo simplificado que esquematice el desarrollo de los yacimientos metálicos en los centros de expansión oceánica. El agua penetra más allá del fondo marino en las cercanías de la zona activa de acreción litosférica. Circula, dentro de la zona constituida por corteza oceánica reciente muy fracturada, hasta una profundidad de unos pocos kilómetros y es calentada hasta una temperatura de varios centenares de grados centígrados. El agua calentada reacciona con la corteza basáltica; de la roca basáltica se disuelven un conjunto de elementos que son arrastrados en solución por el agua hidrotermal; ésta, por convección, sube de nuevo hacia arriba atravesando el fondo marino. El hierro y el manganeso se oxidan, se separan parcialmente y precipitan, junto con la sílice y otros elementos menores. Varios elementos, entre los que se encuentra el fósforo, los elementos de las tierras raras y algunos metales traza, son eliminados del agua de mar e incorporados al yacimiento.

Los elementos aportados a los sistemas hidrotermales por la corteza basáltica derivan en última instancia del manto, ya que los basaltos de las dorsales oceánicas se producen por fusión parcial de material del manto a profundidades comprendidas entre 25 y 50 kilómetros. Sin embargo, además de esto, los sistemas hidrotermales de los bordes de placa en acreción pueden ser responsables de la descarga en el océano de gases que proceden directamente del manto. Un ejemplo de este tipo de desgasificación del manto es el descubrimiento de helio no atmosférico a lo largo de los centros oceánicos de expansión. La composición isotópica del helio sugiere su procedencia del manto. No se puede excluir, por tanto, la posibilidad de que algunos de los elementos asociados con los centros de oceánica puedan originarse directamente de este modo en el manto.

Se ha estimado que un volumen de agua igual al volumen total de los océanos actuales ha sufrido circulación hidrotermal por debajo del fondo marino, en los centros de expansión, en 100 millones de años, o menos. Este cálculo nos da un valor de la importancia que estos sistemas hidrotermales tienen para explicar la química del agua de mar y los intercambios químicos producidos entre las envolturas sólida y líquida de la tierra.



ABERTURA HIDROTERMAL, fotografiada a una profundidad de 2500 metros, cerca del centro de expansión de los Galápagos, por investigadores a bordo del *Alvin*. El agua caliente que sale de la abertura ha atraído muchos más organismos que los que se podrían hallar en otras partes del fondo marino. Las aberturas hidrotermales están asociadas a la precipitación de metales.



NODULOS DE MANGANESO fotografiados en el fondo del Pacífico meridional. Representan un proceso hidrogénico según el cual se forman yacimientos metálicos en los océanos. En este proceso, el metal presente en el agua en pequeñas cantidades, y que en parte ha sido traído por los ríos desde las tierras emergidas, es extraído de la misma por oxidación o por determinados organismos que viven en el mar. Los yacimientos metalíferos construidos de esta forma se desarrollan lentamente. La tasa de crecimiento es baja: un milímetro de espesor tarda en formarse 1000 años.

La corteza oceánica se aleja de los ejes de acreción a una velocidad comprendida entre uno y unos pocos centímetros por año. Con el tiempo, la corteza llega a un borde de cuenca oceánica incorporándose a una serie de procesos geológicos tan complejos como son la subducción y la colisión. Durante estos procesos, pueden emerger fragmentos de litosfera oceánica hasta aflorar en tierra firme en los márgenes continentales. En distintas partes del mundo se han identificado fragmentos de litosfera oceánica antigua, a los que se les conoce con el nombre de ofiolitas. ¿Se pueden identificar en las ofiolitas yacimientos metálicos como los que existen en la litosfera oceánica actual? Por supuesto que sí.

Un ejemplo de ello nos lo proporcionan los complejos ofiolíticos del Mesozoico superior (hace unos 100 millones de años) que afloran en los Apeninos de Italia septentrional. Igual que los complejos parecidos existentes en otras partes, están constituidos por un horizonte sedimentario superior, un horizonte de basalto (que corresponde a la parte superior de la corteza oceánica), una zona formada por gabro (la parte inferior de la corteza oceánica) y un horizonte ultramáfico correspondiente al manto superior oceánico. En las ofiolitas existen yacimientos metálicos particularmente ricos en manganeso, localizados en la base de la serie sedimentaria, precisamente encima de la zona que estaba en contacto con el basalto. Esta estratigrafía es igual a la que se ha encontrado asociada a los yacimientos metálicos en los océanos actuales, tal como han puesto de manifiesto los sondeos del *Glomar Challenger*. Además, la geoquímica de los yacimientos sedimentarios de las ofiolitas de los Apeninos es idéntica a la de los yacimientos de los centros de expansión oceánica actuales. Resultados similares obtenidos en los complejos ofiolíticos de Chipre y en los de otras partes demuestran que sus sedimentos ricos en metales se formaron originalmente por actividad hidrotermal en antiguos centros de expansión.

El estudio de las ofiolitas, no solamente confirma la validez del modelo de la metalogénesis hidrotermal, sino que sugiere, asimismo, que se forman clases adicionales de yacimientos metálicos en los centros oceánicos de expansión. Dentro de las unidades basálticas de las ofiolitas de los Apeninos, existen yacimientos de sulfuros de hierro, cobre, plomo y cinc, conocidos desde antiguo, y que habían sido explotados por los romanos. Los yacimientos consisten, generalmente, en grandes mineralizaciones lenticulares de hasta unos 100 metros de espesor, emplazadas entre coladas basálticas, o en sistemas de venas mineralizadas y concentraciones diseminadas dentro de la roca basáltica. Se conocen yacimientos parecidos en Chipre, en Luzón (Filipinas) y en otros muchos complejos ofiolíticos, donde han suministrado cantidades importantes de cobre, plomo y cinc.

La constatación de que las ofiolitas son fragmentos de antigua corteza litosférica y el descubrimiento de que en las zonas de acreción de la litosfera oceánica actual se asientan grandes sistemas hidrotermales han permitido esclarecer el origen de los yacimientos de sulfuros metálicos de los complejos ofiolíticos. Durante la circulación del agua marina por debajo del fondo oceánico, las aguas quedan fuertemente reducidas. Incorporan metales, enriqueciéndose igualmente en azufre gracias, en parte, a su disolución de las rocas basálticas y, en parte, a la reducción de iones sulfato del agua del mar. Estas condiciones favorecen la combinación del azufre con determinados metales (sobre todo hierro, cobre, plomo y cinc), que son eliminados así de las soluciones hidrotermales para formar minerales sulfurosos insolubles.

Resulta evidente, consiguientemente, que pueden formarse yacimientos de sulfuros metálicos, parecidos a los observados en los complejos ofiolíticos, en los centros de expansión, dentro de la corteza oceánica basáltica, en virtud de los mismos sistemas hidrotermales que dan lugar a los yacimientos sedimentarios ricos en metales que allí se encuentran. La cantidad de sulfuros metálicos que precipitan de los sistemas hidrotermales por debajo del fondo oceánico depende de ciertos factores, a saber: la temperatura de las soluciones hidrotermales, la profundidad y velocidad de circulación del agua marina en el sistema hidrotermal, la concentración de los metales y del sulfuro, etcétera. La extracción de ciertos metales de la solución, causada por la precipitación de sulfuros antes de que la solución surja a través del fondo oceánico, puede producir el fraccionamiento de estos metales. Por ejemplo, el manganeso no forma fácilmente minerales sulfurosos. Se mantiene, por tanto, en solución hasta que el agua hidrotermal es descargada a través del fondo marino. Por otra parte, el hierro precipita parcialmente dentro de la corteza en forma de sulfuro de hierro. Este fraccionamiento podría explicar, en cierto sentido, por qué algunos yacimientos sedimentarios hidrotermales, existentes sobre el fondo oceánico, son ricos en manganeso, pero carecen casi por completo de hierro.

¿Nos prueban de alguna manera los basaltos oceánicos actuales que exista una precipitación de sulfuros metálicos debida al proceso hidrotermal? Sí lo prueban. Algunos basaltos alterados hidrotermalmente, procedentes de la Dorsal centroatlántica, se encuentran muy mineralizados por venas y concentraciones diseminadas de calcopirita (sulfuro de hierro y cobre), pirita (sulfuro de hierro) y otros sulfuros metálicos. Estas mineralizaciones son idénticas a aquellas otras que, en los complejos ofiolíticos, están estrechamente asociadas a yacimientos masivos de minerales sulfurosos metálicos. No es verosímil que se descubra un yacimiento de sulfuros masivo gracias a sondeos realizados en la corteza oceánica, pero, tarde o temprano, tendrá que ocurrir.

Los complejos ofiolíticos pueden proporcionar también información sobre la generación de metales en zonas profundas de la corteza oceánica y del manto superior, por debajo de la zona alcanzada por los sistemas hidrotermales. Algunos de los mayores yacimientos de cromita del mundo, muchos de los cuales están asociados a concentraciones de níquel y platino, se encuentran en ofiolitas dentro de rocas ultramáficas; éstas representan lo que anteriormente había sido el manto oceánico superior. Tales concentraciones de cromita se formaron originalmente a 10 kilómetros, o más, por debajo del fondo oceánico por segregación a partir de bolsas de magma esparcidas en el manto superior, a lo largo de los bordes de placa en acreción. Estas bolsas se generan, probablemente, por fusión parcial de rocas ultramáficas del manto. La fusión se produce por disminución de la presión durante la ascensión de material del manto que ocurre bajo un eje de expansión.

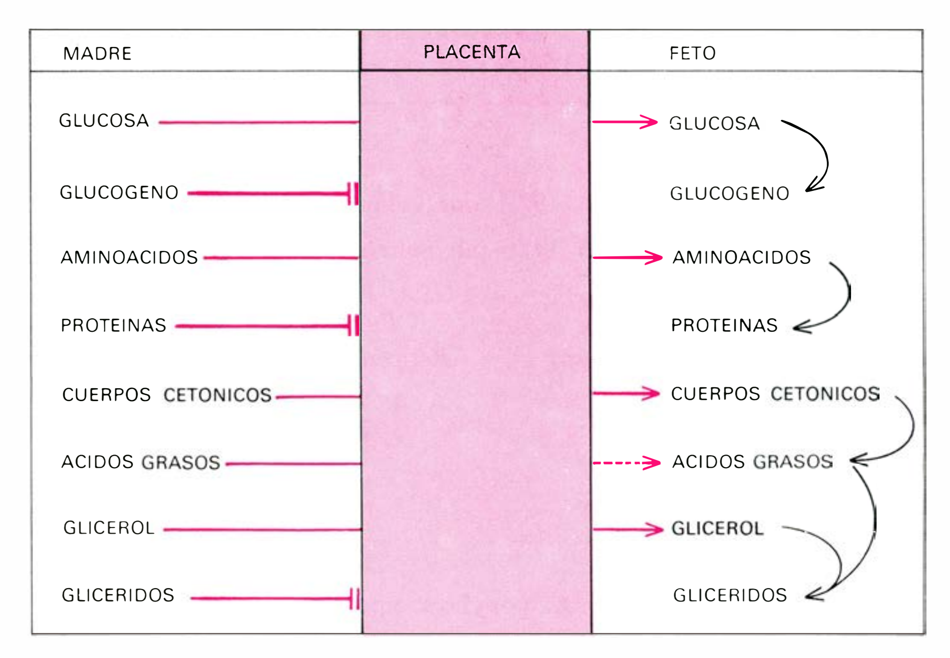
En los océanos se han obtenido muestras de rocas ultramáficas, derivadas del manto; ello ha sido en zonas donde existen bloques constituidos por materiales del manto superior que fueron levantadas hasta aflorar en el fondo. Las rocas ultramáficas oceánicas contienen concentraciones de cromita (generalmente pequeñas). De todas formas, es improbable que nadie, en un próximo futuro, sea lo suficientemente afortunado como para sacar del océano muestras de yacimientos concentrados de cromita de los tipos que se encuentran junto a las ofiolitas de Chipre y Luzón.

Metabolismo intermediario durante el embarazo

El feto se desarrolla a expensas de la madre, por lo que ésta ha de adaptar su metabolismo para mantener el aporte de metabolitos a aquél; la situación se hace crítica en caso de ayuno: la madre moviliza todas sus reservas para preservar al feto

Emilio Herrera

En el embarazo, la madre se encuentra "de novo" con un activo parásito, el feto, que se desarrolla, diferencia y crece ininterrumpidamente. Desde el punto de vista metabólico, el feto se encuentra en un continuo anabolismo. Esto significa que existe una preponderancia de la síntesis y depósito de componentes tisulares sobre la degradación de los mismos. Así, el feto llega a acumular cantidades considerables de elementos de reserva; especialmente grasas, en forma de glicéridos neutros, que son ésteres de ácidos grasos con el glicerol, y carbohidratos, en forma de glucógeno, que es un polímero formado por numerosas moléculas de glucosa unidas entre sí (véase "Metabolismo de los glicéridos en el tejido adiposo", por E. Herrera, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero, 1977). El anabolismo fetal se extiende también a compuestos estructurales y funcionales, como es el caso de las proteínas, las cuales son polímeros de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. Las proteínas, además de formar parte estructural de los tejidos, tienen un importante papel funcional: intervienen en la expresión de la información genética, son constituyentes fundamentales de los enzimas (catalizadores biológicos), participan en la acción hormonal, etcétera.



PASO DE COMPUESTOS METABOLICOS a través de la placenta. La glucosa, los aminoácidos, los cuerpos cetónicos, el glicerol, y, en menor proporción, los ácidos grasos libres, cruzan la placenta en dirección de la madre al feto. El glucógeno, las proteínas y los glicéridos no atraviesan la placenta, por lo que son sintetizados por el feto a partir de los compuestos más elementales: el glucógeno a partir de moléculas de glucosa, las proteínas a partir de aminoácidos, y los glicéridos a partir de ácidos grasos y glicerol. Los ácidos grasos pueden ser sintetizados por el feto a partir de los cuerpos cetónicos; de ahí que la síntesis de glicéridos en el feto no dependa, de una manera exclusiva, de la reducida aportación de ácidos grasos libres procedentes de la madre gestante.

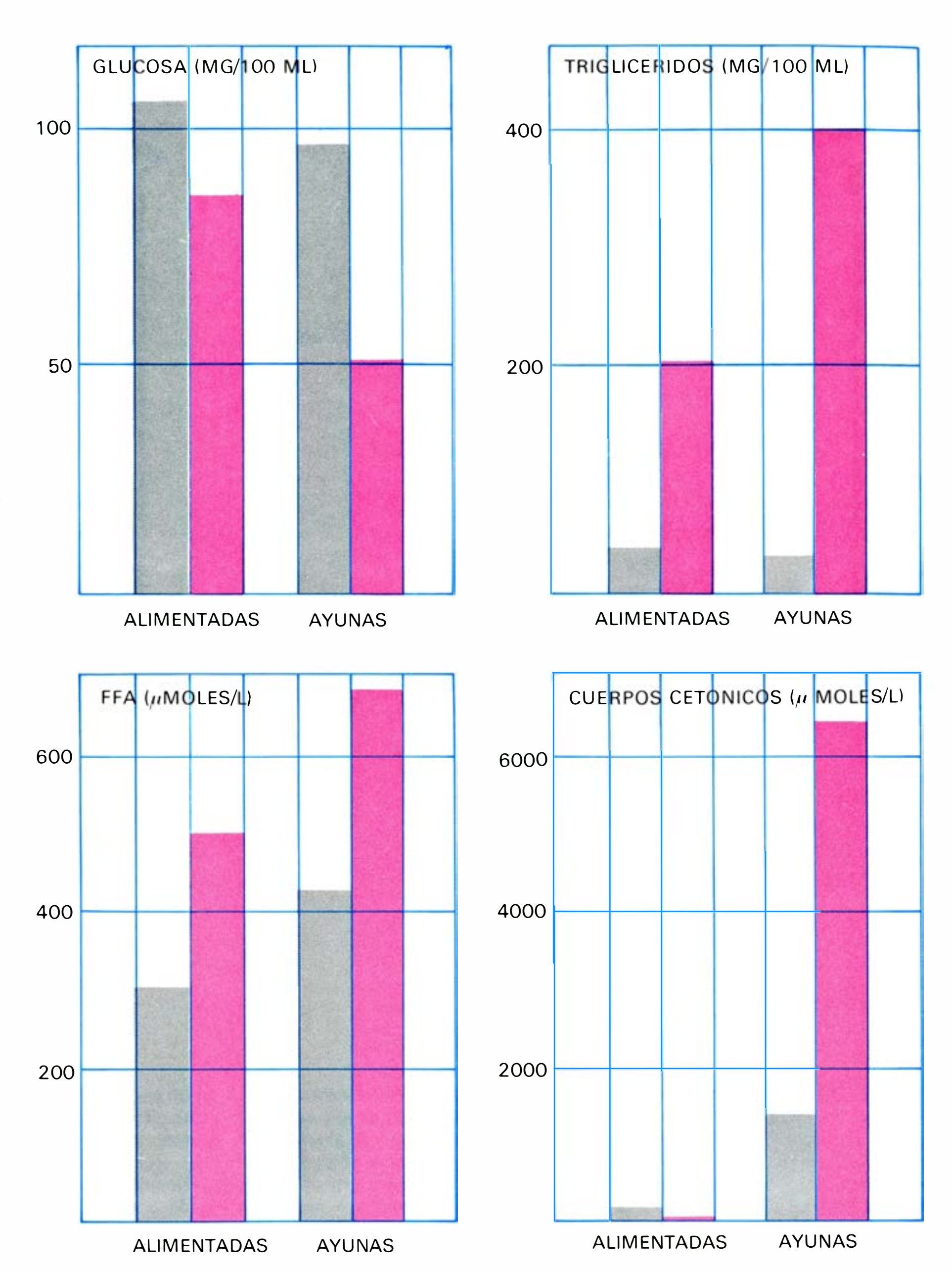
El feto puede sintetizar glicéridos, glucógeno y proteínas a partir de sus compuestos más elementales: glicerol y ácidos grasos, glucosa y aminoácidos, respectivamente. Sin embargo, carece de la maquinaria enzimática adecuada para llegar a sintetizar esos compuestos elementales, por lo que éstos han de provenir de la madre. Así pues, el desarrollo fetal se realiza a expensas del aporte de sustratos metabólicos procedentes de la madre, y que le llegan a través de la placenta *(véase la ilustración de esta misma página).* Aunque no se conoce cuantitativamente el porcentaje relativo de compuestos que pasan de la madre al feto, ya que esto varía en función de la situación metabólica de aquélla, está bien establecido que los ácidos grasos, los glicéridos y las moléculas de gran tamaño, como las proteínas y los polisacáridos (entre éstos, el glucógeno), cruzan mal la placenta. Así pues, son los aminoácidos y los monosacáridos (especialmente, la glucosa), junto con compuestos derivados de la degradación oxidativa de los ácidos grasos, los cuerpos cetónicos, los principales metabolitos que pasan de la madre al feto, para ser utilizados por éste como fuentes de energía o como elementos para la síntesis de sus componentes estructurales, funcionales y de reserva.

La primera pregunta que surge es cómo puede soportar la madre esta continua extracción de sustancias nutritivas, para soportar el continuo crecimiento fetal y para mantener a la vez su propia supervivencia. La importancia de esta pregunta puede visualizarse en un ejemplo concreto, como es el mantenimiento de los niveles plasmáticos de glucosa. Los niveles de glucosa en sangre son prácticamente constantes durante toda la vida de un animal, con in-

dependencia de su situación alimentaria, de la edad, del sexo, e incluso de la especie (el hombre, el perro y la rata, por ejemplo, mantienen niveles de glucosa en sangre que oscilan entre 85-120 mg/100 ml). Esto permite que se mantenga ininterrumpido el aporte de glucosa a tejidos como el sistema nervioso, el riñón y células sanguíneas que necesitan constantemente este metabolito para su funcionamiento. La constancia de los niveles de glucosa se logra por la integración metabólica de varios tejidos, la cual se comprende mejor mediante un símil hidráulico, como el que se presenta en la ilustración de las páginas 16 y 17. La fuente principal de glucosa en el organismo es la procedente de la absorción intestinal, tras la digestión de los carbohidratos de la alimentación. El consumo de glucosa por los distintos tejidos compensa esta rápida entrada de glucosa en la sangre.

El hígado es el tejido que tiene el umbral más alto de captación de glucosa, pero es también el que posee mayor capacidad para su acúmulo. Así, cuando el nivel de glucosa en la sangre se eleva por encima de los límites de la normoglucemia, el exceso de glucosa es captado por el hígado, donde se acumula en forma de glucógeno. En situaciones de ayuno, el consumo de glucosa disminuye en aquellos tejidos que, como el músculo y otros, pueden utilizar otras fuentes de energía metabólica (especialmente los ácidos grasos libres, derivados del metabolismo del tejido adiposo), y el hígado moviliza sus reservas de glucógeno para cederlo en forma de glucosa libre a la sangre. A su vez, el hígado (y también la corteza renal) sintetiza glucosa a partir de otros metabolitos, en especial de los aminoácidos, derivados principalmente de la degradación de las proteínas musculares. Con ello, los niveles de glucosa en la sangre llegan a mantenerse dentro de un margen aceptable por períodos relativamente prolongados de ayuno.

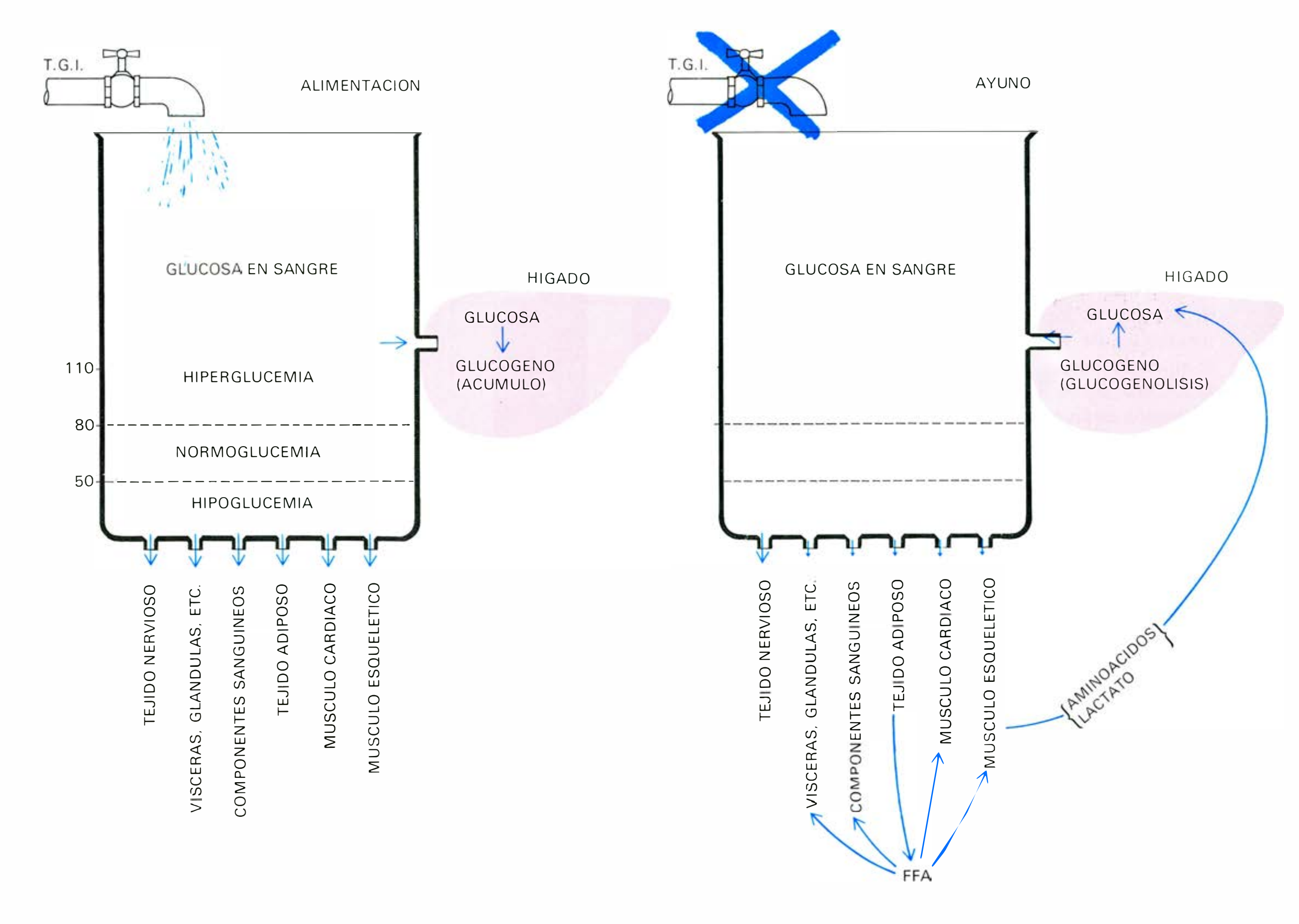
Esta capacidad de adaptación metabólica se pone en peligro durante el embarazo, ya que la placenta, y más aún los tejidos fetales, consumen gran cantidad de glucosa y de los compuestos que pueden transformarse en ella, como son los aminoácidos. Esto compromete el equilibrio metabólico de la madre en ayunas, donde el desarrollo fetal no se interrumpe. De hecho, se ha demostrado que el tamaño fetal no se altera con una deficiente alimentación materna, tanto en humanos (en épocas de guerra o en zonas pobres) como en animales experimentales. En la rata, por ejemplo, un ayuno de 48 horas (casi un 10 por ciento de su período gestacional) prácticamente no altera el peso de los fetos.



NIVELES DE CARBURANTES METABOLICOS en la sangre de ratas preñadas, al día 19 de gestación *(barras rojas)* **y de controles vírgenes** *(barras grises).* **En animales alimentados, los niveles de glucosa y cuerpos cetónicos están disminuidos y los de FFA y triglicéridos aumentados en las ratas preñadas. Tras un ayuno de 48 horas, la glucemia desciende más en las ratas preñadas, pero esto es contrarrestado por un mayor aumento en los componentes lipídicos de la sangre.**

Con el propósito de conocer las interrelaciones carbohidratos-lípidos durante el embarazo, y dada la importancia del tema para determinar la base bioquímica de la predisposición a la diabetes y la obesidad durante la gestación, nosotros llevamos más de doce años estudiando distintos parámetros metabólicos en la rata preñada. Este animal es utilizado como modelo experimental, y los resultados obtenidos pueden ser extrapolados para un mejor conocimiento del metabolismo en el embarazo humano.

Nuestros primeros trabajos sobre el tema estuvieron dedicados a determinar los niveles circulantes de carburantes metabólicos en la sangre de la rata al día 19 de gestación, comparándolos con los encontrados en animales vírgenes, de igual edad y sexo, utilizados como controles. Esto nos iba a permitir conocer de forma global, y como primera aproximación, si la madre lograba compensar de alguna forma la continua succión metabólica por parte del feto. Conviene indicar que el período gestacional en la rata es de 22 días, por lo que al día 19 el crecimiento fetal es máximo, de tal forma que, en esta fase final del embarazo, el peso de los fetos se duplica ca-

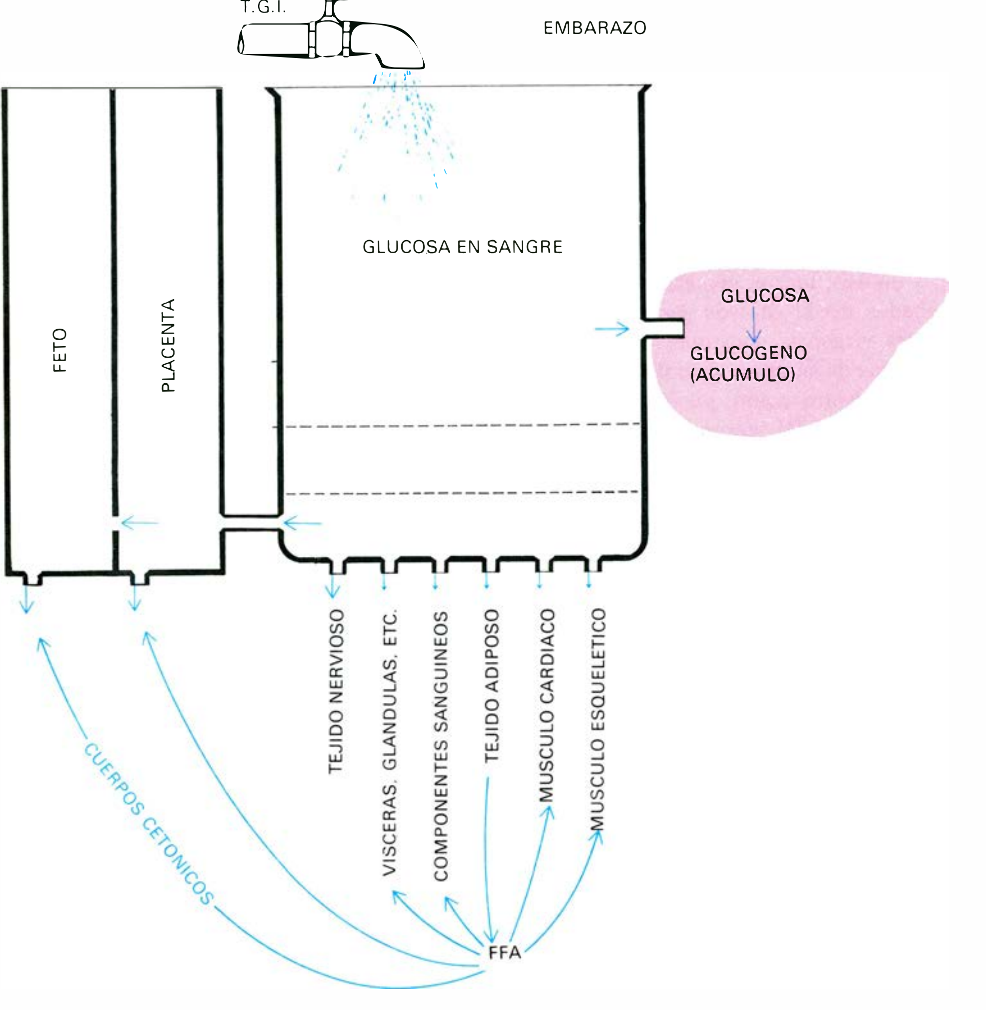


LA REGULACION DE LA GLUCEMIA en el *individuo alimentado* se logra mediante el balance entre la glucosa absorbida por el tracto gastrointestinal (T.G.I.), derivada de la dieta, y el consumo de glucosa por los distintos tejidos. El exceso de glucosa es acumulado en el hígado en forma de glucógeno. *En ayunas,* la movilización de ácidos grasos libres (FFA) del tejido adiposo y su consumo por diversos tejidos, permite un ahorro de glucosa. A esto se une la activación de glucogenólisis (degradación de glucógeno a glucosa) y la gluconeogénesis (síntesis de glucosa a partir de compuestos no hidrocarbonados) en el hígado. Con ello, este órgano cede glucosa a la sangre, permitiendo mantener unos niveles normales de glucosa para aquellos tejidos en los que, como el tejido nervioso, su funcionamiento depende casi exclusivamente de ella.

da día. Como se ilustra en la página 15, la madre alimentada no logra mantener inalteradas las concentraciones de metabolitos en sangre, ya que aparecen disminuidos los niveles circulantes de glucosa y cuerpos cetónicos, con relación a los que se observan en el animal control. Así pues, la succión de estos metabolitos por el feto ha sido superior que la llegada de los mismos a la sangre materna. Los lípidos circulantes (triglicéridos y ácidos grasos libres), sin embargo, aparecen aumentados en la rata gestante, en parte debido a que, como hemos indicado arriba, estos compuestos lipídicos cruzan mal la placenta, por lo que la succión de ellos por el feto es baja.

La hiperlipemia (concentración excesiva de lípidos en sangre) del embarazo es frecuente en todas las especies, incluyendo al hombre, y es a su vez una de las principales causas de los trastornos metabólicos que se presentan en numerosas ocasiones en la madre. Por ello, era de especial interés el análisis de sus causas. Independientemente de la dificultad de los lípidos en cruzar la placenta, su aumento en la sangre materna podría estar influido por un aumento en la síntesis de los mismos, o por una aumentada llegada de ellos a la sangre, procedentes de las reservas endógenas de la madre. Puesto que el tejido adiposo es el tejido que más eficazmente se ha diferenciado para el acúmulo y movilización de lípidos, nosotros hemos estudiado el metabolismo intrínseco de este tejido procedente de ratas preñadas y de sus respectivos controles.

De acuerdo con las principales vías metabólicas del tejido adiposo *(véase la ilustración de la página 18),* hemos determinado las actividades de síntesis de ácidos grasos (lipogénesis) y de glicerol de glicéridos (glicerogénesis) a partir de glucosa, la velocidad de hidrólisis de los glicéridos hasta ácidos grasos libres y glicerol (lipolisis) y la reincorporación de los ácidos grasos libres a las moléculas de los glicéridos (reesterificación). Los resultados obtenidos demuestran que todas estas vías metabólicas están más activas en el tejido adiposo lumbar de la rata preñada que en sus controles *(véase la ilustración de la página 18).* Esta hiperactividad del tejido adiposo materno explica la predisposición a la obesidad en el embarazo, pero no justifica la hiperlipemia; ya que la mayor liberación de lípidos del tejido adiposo a la sangre (lipolisis aumentada) es compensada por las intensas lipogénesis, glicerogénesis y reesterificación, permitiendo a la madre un balance positivo hacia la conservación de grasas más que a su liberación.



En el embarazo **aumenta el consumo de glucosa, ya que la placenta, y más aún el feto, utilizan glucosa materna. La madre logra mantener unos niveles de glucemia próximos a los normales mediante un aumento en la cantidad diaria de ingesta y un activo metabolismo del tejido adiposo. Los FFA liberados por este tejido son utilizados tanto por estructuras maternas como fetales. Debido a la dificultad de los FFA para atravesar la placenta, una gran proporción de ellos llega al feto en forma de productos de su metabolismo en el hígado materno, los cuerpos cetónicos.**

De hecho, durante el embarazo aumenta incluso la masa de tejido adiposo de la madre, lo que le permite mantener una abundante reserva metabólica endógena para situaciones de restricción alimentaria, asegurando así su supervivencia a pesar del continuo drenaje fetal.

La hiperlipemia del embarazo podría, sin embargo, estar influida por una disminución de la captación y metabolización de los glicéridos de la sangre por los distintos tejidos. Los glicéridos, al ser insolubles en medios acuosos, circulan por sangre en forma de pequeñísimas partículas, constituidas por la asociación de glicéridos con proteínas y con otros lípidos más polares (es decir, con mayor afinidad por el agua), como son los fosfolípidos y el colesterol. Estas partículas o asociaciones de lípidos con proteínas se denominan lipoproteínas, las cuales proceden de la absorción intestinal de las grasas, o son sintetizadas endógenamente (preferentemente por el hígado). Las lipoproteínas circulantes llegan a través de la sangre a los distintos tejidos del organismo, donde existe un enzima, la lipoproteinlipasa, que es especialmente activa en el hígado y el tejido adiposo. Este enzima cataliza la degradación de las lipoproteínas; de manera específica, facilita la hidrólisis de los glicéridos en glicerol y ácidos grasos libres, que son captados y metabolizados o acumulados en los correspondientes tejidos. En caso de una disminuida actividad de la lipoproteinlipasa, los glicéridos no pueden ser hidrolizados y captados, lo que produce un aumento de su concentración en sangre.

Ante la posibilidad de que la hiperlipemia del embarazo pudiera también estar influida por una alteración en la actividad de la lipoproteinlipasa, nos propusimos realizar un análisis cuantitativo de la misma en nuestros animales experimentales. Cabía la posibilidad de determinar y comparar la actividad de este enzima en diferentes tejidos de la rata preñada y sus controles vírgenes. Sin embargo, la lipoproteinlipasa es un enzima mal conocido hasta ahora. No se ha conseguido su purificación, y, además, la naturaleza, características funcionales y localización celular del mismo varían de unos tejidos a otros. Así pues, la determinación de las correspondientes actividades tisulares no nos permitiría llegar a conocer el papel fisiológico global que dichas actividades representan en la economía metabólica del individuo completo.

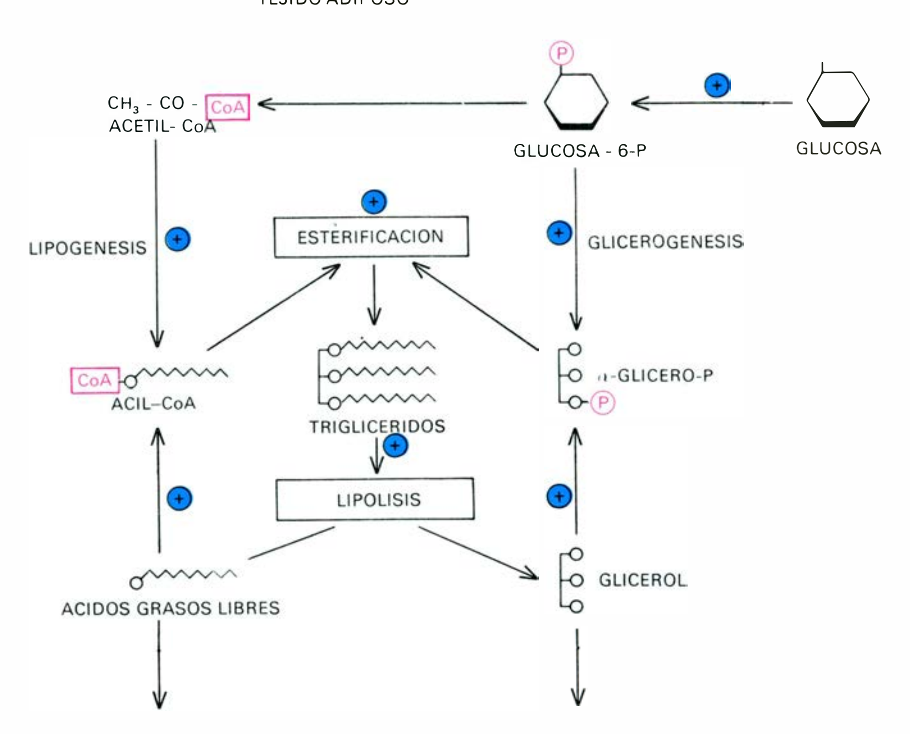
Esta dificultad nos llevó a planificar un experimento *in vivo,* en colaboración con los profesores Knopp y Montes, de la Universidad de Washington, en Seattle, en el que pudiéramos estudiar directamente las velocidades de metabolización de lipoproteínas en el animal completo. El experimento *(véase la ilustración de la página 20)* se basaba en estudiar la desaparición de la sangre y su aparición en los diferentes tejidos de lipoproteínas radiactivas, a distintos tiempos de su administración por vía intravenosa. Existen métodos de preparar lipoproteínas artificiales radiactivas; sin embargo, el comportamiento fisiológico de las mismas podría diferir sustancialmente del comportamiento de las lipoproteínas naturales. Por este motivo, decidimos premarcar con radiactividad los glicéridos de lipoproteínas específicas de la rata. Puesto que la biosíntesis de los triglicéridos se realiza a partir de glicerol y ácidos grasos libres, a través de reacciones que implican su previa activación a α-glicerofosfato y acil-coenzima A, inyectamos intravenosamente, a ratas normales, glicerol marcado con hidrógeno radiactivo (tritio, cuyo símbolo es H^3), y un ácido graso, el ácido palmítico, marcado con un isótopo radiactivo distinto del anterior, el carbono radiactivo (C^{14}), para lograr diferenciarlo del H^3 en función de su distinta energía. Pudimos comprobar que a los 20 minutos de la inyección de ambos sustratos radiactivos, obteníamos una máxima incorporación de radiactividad en las lipoproteínas de muy baja densidad (denominadas VLDL, iniciales de su denominación inglesa, en función de su índice de flotación en gradientes de densidad, con relación a las otras lipoproteínas plasmáticas) de la sangre.

Una vez purificadas y analizadas estas lipoproteínas *(véase la ilustración de la pá-*

gina 20), pudimos comprobar que todo el H^3 que se había incorporado en ellas se encontraba en el glicerol de sus triglicéridos, mientras que todo el C^{14} aparecía en los ácidos grasos esterificados en las mismas moléculas de triglicéridos. Habíamos logrado, pues, la síntesis *in vivo* de lipoproteínas naturales premarcadas con radiactividad, las que, después de una exhaustiva purificación por ultracentrifugación y diálisis, fueron inyectadas a ratas preñadas de 21 días de gestación y a animales vírgenes, controles. Extrajimos muestras de sangre a distintos tiempos de la administración, purificando y analizando las VLDL correspondientes. Encontramos *(véase la ilustración de la página 19)* que la desaparición de las lipoproteínas radiactivas de la sangre de las ratas preñadas era considerablemente más lenta que de la sangre de los controles. Estos resultados concordaban con una menor incorporación de C^{14} y H^3 en los lípidos de los distintos tejidos de la madre (hígado, tejido adiposo, corazón, etcétera).

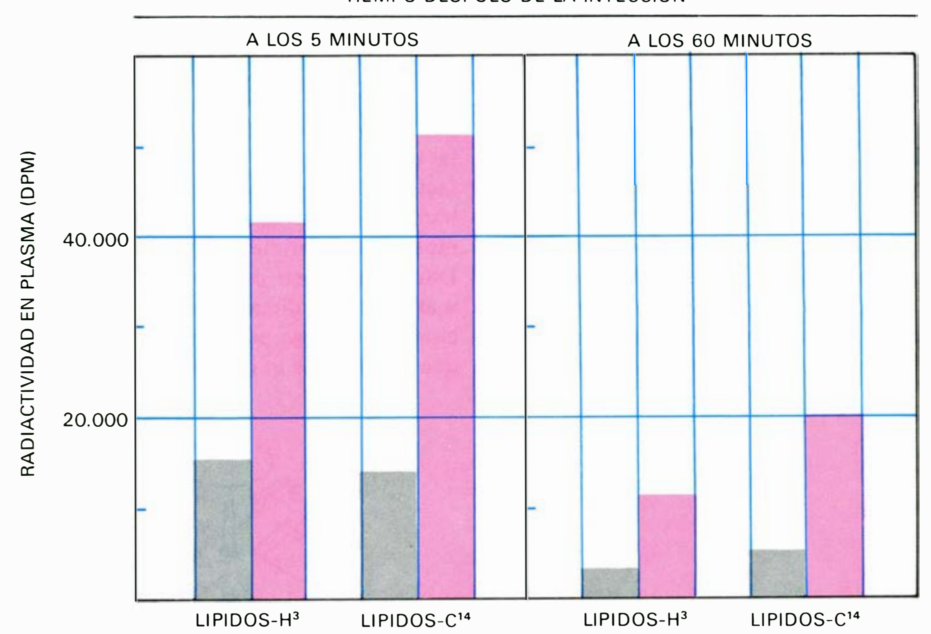
Los anteriores experimentos nos permitían concluir que, en el embarazo, no sólo está aumentada la síntesis y movilización de las grasas endógenas, sino que la incorporación y metabolización de los lípidos circulantes por sangre está disminuida en los distintos tejidos maternos. La yuxtaposición de estos factores son, por tanto, los responsables de la mantenida hiperlipemia durante el embarazo, la cual permite a la madre mantener una reserva "flotante" de lípidos, para ser utilizada en situaciones de restricción alimentaria, tanto en beneficio del feto como para su propia economía metabólica.

Esta interpretación concuerda con los resultados obtenidos en animales en ayunas de 48 horas. En esta situación, los niveles de glucosa en la sangre de la madre disminuyen a valores de franca hipoglucemia *(véase la ilustración de la página 15),* lo que se compensa con un enorme aumento del consumo de lípidos. Así, los niveles de triglicéridos y ácidos grasos libres aparecen en la sangre de la madre en ayunas aún más elevados de lo que estaban cuando alimentada. A su vez, los cuerpos cetónicos, que se derivan de la oxidación de los ácidos grasos y que estaban disminuidos en la sangre de la rata preñada alimentada, aumentan tras el ayuno a valores que son más de cinco veces superiores a los de las ratas controles. Este activo catabolismo lipídico en la madre en ayunas también beneficia al feto, ya que, como arriba habíamos indicado, los cuerpos cetónicos cruzan la placenta y pueden ser utilizados



LAS PRINCIPALES VIAS METABOLICAS del tejido adiposo son la lipogénesis (síntesis de ácidos grasos), esterificación (formación de glicéridos a partir de las formas activas de los ácidos grasos, los acil-CoA, y del glicerol activo, el α-glicerofosfato) y lipolisis (hidrólisis de triglicéridos en ácidos grasos libres y glicerol). El paso de los ácidos grasos libres y glicerol a sus respectivas formas activas se realiza a expensas de energía metabólica del tejido, en forma de ATP. Estas vías se hallan más activas (+) en el tejido adiposo de la rata preñada que en sus controles.





LA VELOCIDAD DE METABOLIZACION DE VLDL-H^3-C^{14} en ratas preñadas *(barras rojas)* **y controles** *(barras grises)* **se determinó inyectando las VLDL radiactivas, preparadas según se indica en la ilustración de la página 20. Aquí se presentan los valores de radiactividad en lípidos-H^3 (glicerol de glicéridos) y en lípidos-C^{14} (ácidos grasos esterificados), encontrados en las VLDL de la sangre de los animales, a los 5 y 60 minutos de la inyección. Se observa que la radiactividad que se registró en la sangre de las ratas preñadas fue siempre superior a la de sus controles.**

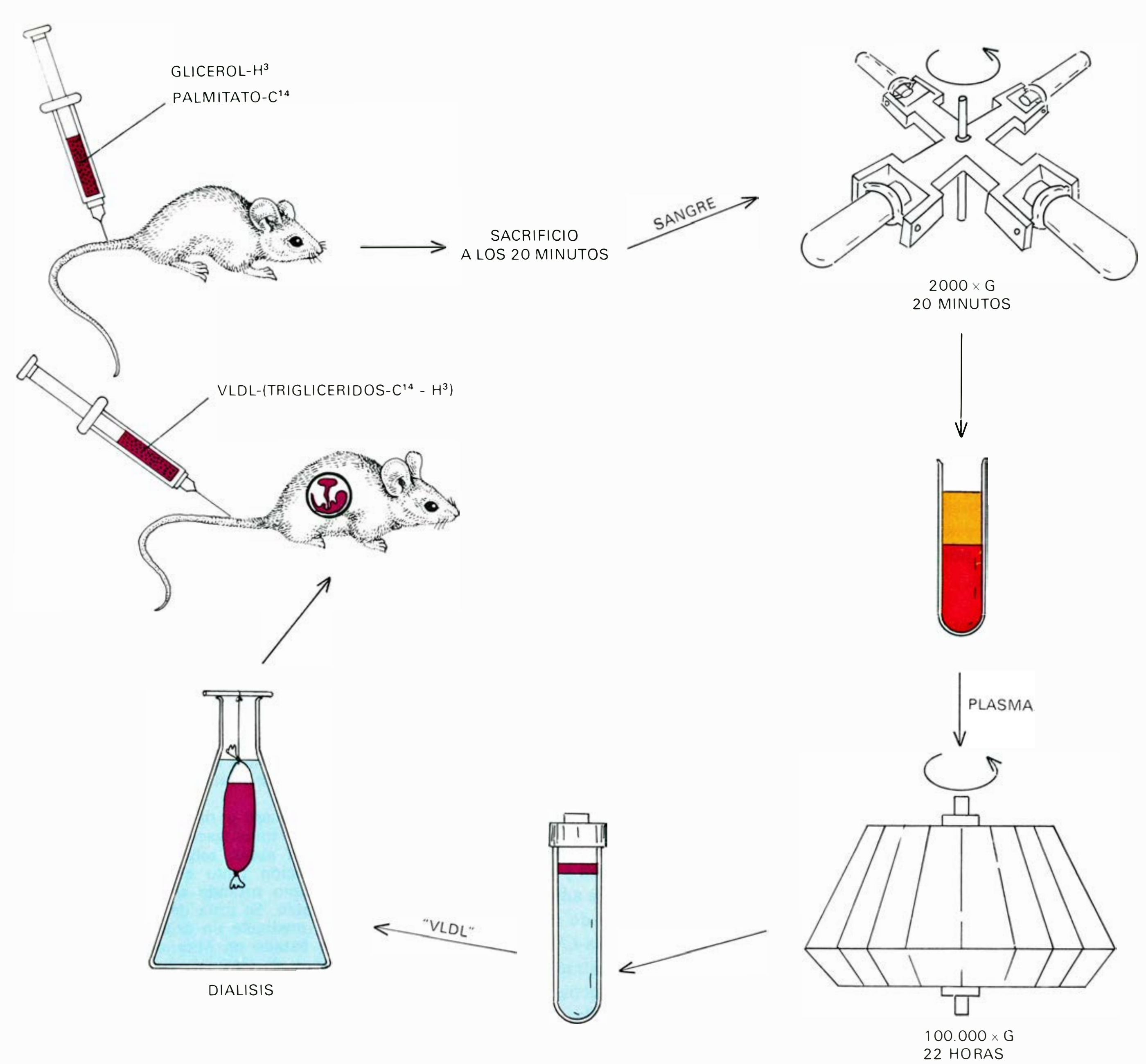
por el feto. De hecho, nosotros hemos observado recientemente que productos derivados del metabolismo de los cuerpos cetónicos, como es el citrato, aumentan en las estructuras fetales que tienen que mantener un desarrollo ininterrumpido (el cerebro, por ejemplo), a pesar del ayuno materno.

El activo metabolismo lipídico no ha sido suficiente para economizar glucosa en la madre. En la ilustración de las páginas 16 y 17 vimos cómo, en ayunas, la utilización de ácidos grasos permite el ahorro de glucosa por otros tejidos, y de esta forma mantenerse la glucemia dentro de unos límites similares a los que se observan en los individuos alimentados *ad libitum.* Sin embargo, la madre en ayunas presentaba una intensa hipoglucemia, lo que podría deberse a una incapacidad para activar la gluconeogénesis (formación de glucosa a partir de precursores que no son carbohidratos) o a una exagerada succión de glucosa por parte del feto, que la madre no puede compensar a pesar de una gluconeogénesis normal o activada. Era, por tanto, importante conocer la actividad de síntesis de glucosa de la madre con relación a los controles, tanto en situaciones de ayuno como de alimentación. Decidimos estudiar este punto, puesto que no había datos al respecto, y el tema despertaba especial interés por su implicación específica en el conocimiento de las alteraciones metabólicas durante el embarazo, y en general, para comprender mejor los mecanismos de regulación de esta vía metabólica, ya que se conoce que es activada por los ácidos grasos libres y los productos de su catabolismo, como el acetil-CoA *(véase la ilustración de la página 21),* y el embarazo era un modelo fisiológico en el que, como hemos visto, hay una gran abundancia de estos compuestos.

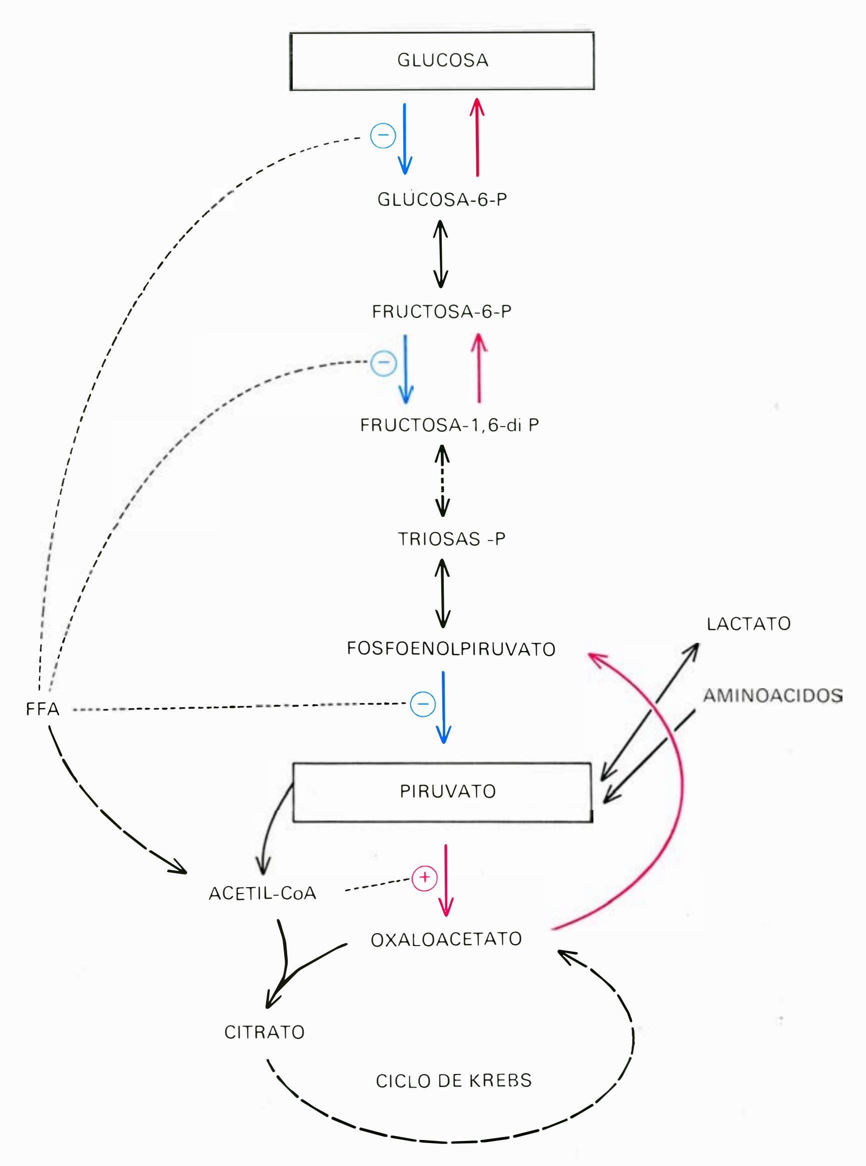
Al igual que habíamos hecho con el estudio de las lipoproteínas, logramos llevar a cabo un protocolo experimental en el que estudiábamos la actividad gluconeogenética *in vivo.* Para ello, inyectamos intravenosamente un precursor de glucosa marcado con carbono radiactivo (el piruvato-3-C^{14}) a ratas preñadas de 19 días de gestación y a controles. A distintos tiempos de la administración se extrajeron muestras de sangre y en ella se purificó la glucosa-C^{14} formada. Como se observa en la ilustración de la página 22, la cantidad de glucosa-C^{14} en la sangre de las ratas preñadas no difería de la de los controles, cuando los animales estaban alimentados. Cuando el experimento se realizó en ratas en ayunas de 48 horas, se observó que ambos grupos de animales presentaban un aumento en la formación de glucosa radiactiva con relación a los valores encontrados en los animales alimentados, pero este aumento era considerablemente más intenso en las

ratas preñadas que en las controles. Puesto que parte de la glucosa formada podría haberse acumulado en el hígado en forma de glucógeno, en vez de salir a la sangre, era necesario determinar aquél para comprobar si las diferencias indicadas se debían a verdaderas diferencias en la capacidad gluconeogenética, o a una menor acumulación de glucógeno radiactivo en el hígado de los controles. Por el contrario, se encontró que las ratas preñadas en ayunas, no sólo presentaban una mayor cantidad de glucosa radiactiva en sangre, sino que la radiactividad de glucógeno de su hígado era más del doble de la aparecida en el de las ratas vírgenes. Así pues, estos resultados demuestran que mientras que la rata preñada alimentada posee una actividad gluconeogenética comparable a la de los controles, tras el ayuno presenta una mayor activación de la gluconeogénesis. Por tanto, la hipoglucemia que se observa en estos animales no se debe a una incapacidad en sintetizar glucosa, sino a la intensa extracción de glucosa por el feto, que no logra ser compensada por la madre a pesar de su elevada gluconeogénesis.

Todas estas alteraciones metabólicas en la madre pueden estar influidas por la presencia del feto, pero han de estar directamente condicionadas por otros factores. En primer lugar, durante el embarazo aumenta la ingesta. Esto se ha demostrado experimentalmente en la rata. Este animal, en condiciones normales, mantiene una dieta equilibrada, proporcional a su peso corporal, de tal forma que la obesidad es rara en él. A partir del



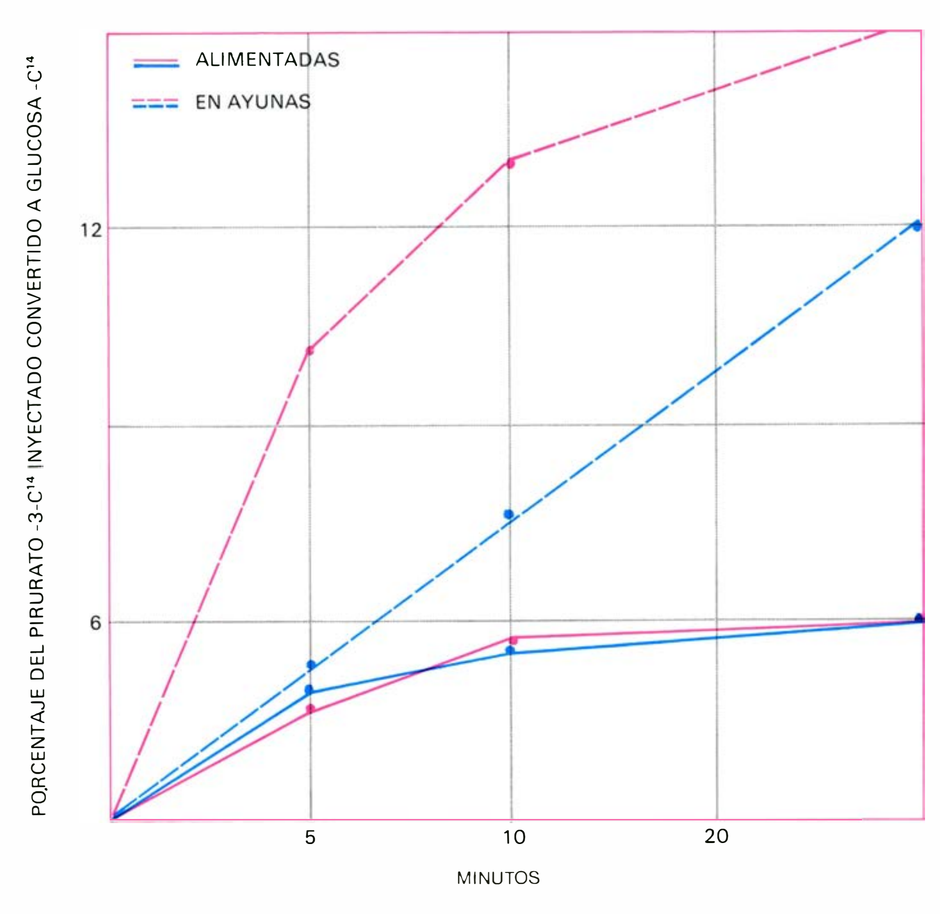
LA PREPARACION de lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL), marcadas en sus triglicéridos con C^{14} y H^3, se realizó mediante la administración intravenosa de glicerol-H^3 y un ácido graso-C^{14} (el palmitato-C^{14}) a la rata. La sangre de estos animales se centrifugó a baja velocidad angular (2000 veces la gravedad, durante 20 minutos) y el sobrenadante (plasma) se utilizó para aislar las VLDL. Estas purificaron el plasma por ultracentrifugación, a una velocidad angular de cien mil veces la gravedad (100.000 g) durante 22 horas, en medio de solución salina (ClNa, 0,15 M) conteniendo en agente protector de iones (EDTA). Dichas lipoproteínas flotan en los tubos después de la ultracentrifugación, lo que es utilizado para su aislamiento y posterior purificación por diálisis. Las VLDL así purificadas aparecían marcadas con radiactividad en sus triglicéridos, de forma que todo el H^3 se encontraba en el glicerol y el C^{14} en los ácidos grasos que lo esterifican. Estas VLDL-H^3-C^{14} se inyectaron a ratas preñadas y controles, para estudiar su velocidad de metabolización. Para ello se tomaba sangre de la cola.



LOS ACIDOS GRASOS LIBRES (FFA) son activadores de la gluconeogenesis, ya que inhiben (–) el funcionamiento de enzimas que catalizan reacciones irreversibles de la glucolisis *(flechas azules).* **De esta forma, facilitan la actividad de las reacciones inversas a ésas, pertenecientes a la gluconeogénesis** *(flechas rojas).* **Por otro lado, el acetil-CoA es el producto final de la β-oxidación de los ácidos grasos, y constituye un activador (+) insustituible para el funcionamiento del primer enzima de la gluconeogénesis a partir de piruvato, la piruvato carboxilasa, que cataliza la transformación de dicho metabolito en oxaloacetato. Los aminoácidos y el lactato son los principales sustratos de la gluconeogénesis, entrando en ella mediante su transformación a piruvato.**

día 12 de gestación, fecha en que se inicia el rápido crecimiento fetal, se observa que la cantidad de dieta que ingiere la rata preñada aumenta progresivamente hasta los últimos días del embarazo. Es lógico pensar que esta mayor ingesta materna influya en los cambios metabólicos descritos, permitiendo el anabolismo neto de la madre, a pesar del ininterrumpido crecimiento fetal.

Un segundo factor que influye también directamente sobre el metabolismo materno es su situación endocrina. Es decir, las variaciones que se producen en el funcionamiento de las glándulas de secreción interna de la madre, que hacen que varíen los niveles de las distintas hormonas segregadas a la sangre. Una de las glándulas más afectadas durante el embarazo es el páncreas, de cuyas células beta se segrega la insulina. Freinkel y colaboradores, en la Northwestern University de Chicago, demostraron que la placenta degrada la insulina. Así pues, para lograr unos niveles normales de insulina en sangre, la madre ha de segregar más cantidad de insulina de su páncreas que en situaciones de no embarazo. Nosotros hemos demostrado, al igual que se había observado en humanos, que los niveles de insulina en la sangre de la rata preñada son más altos que en las ratas vírgenes.



PARA DETERMINAR LA ACTIVIDAD de gluconeogénesis "in vivo", se inyectó piruvato-3-C^{14} a las ratas, determinándose la formación de glucosa-C^{14}, a distintos tiempos de la inyección. Se observó que cuando los animales estaban alimentados, la actividad de gluconeogénesis era igual en ratas preñadas *(en rojo)* **y en controles** *(en azul).* **El ayuno produce un aumento de esta actividad en ambos grupos, pero ello era muy superior en las ratas preñadas que en sus respectivos controles.**

Esta hiperinsulinemia demuestra el enorme esfuerzo realizado por el páncreas materno para compensar la degradación de esta hormona por la placenta. Los efectos metabólicos de la insulina se resumen en la ilustración de la página 23. De entre ellos caben destacar una inhibición de la gluconeogénesis y una activación de la metabolización de la glucosa, facilitando su acúmulo en forma de glucógeno en el hígado, un aumento de la síntesis de ácidos grasos (lipogénesis), una inhibición de la lipolisis (hidrólisis de los glicéridos en tejido adiposo y liberación de sus productos, ácidos grasos libres y glicerol, a la sangre) y una disminución de la beta-oxidación de los ácidos grasos.

El aumento de los niveles circulantes de insulina en la madre contrasta con las alteraciones metabólicas del embarazo, ya que hemos visto que en la madre hay un aumento de la lipolisis y una activación de la gluconeogénesis, más que un incremento de la metabolización de la glucosa. También contrasta con la predisposición a la diabetes en el embarazo, cuando la insulina es la hormona antidiabetogénica por excelencia. Ante esta aparente contradicción, realizamos un estudio de la sensibilidad a la insulina en la rata preñada y sus respectivos controles. Inyectamos intravenosamente insulina a los animales y determinamos las variaciones de glucosa en sangre. Nos encontramos con que, en las ratas preñadas, la insulina producía una menor disminución de la glucosa sanguínea que en los animales vírgenes; esta resistencia a la insulina era aún más pronunciada en las ratas en ayunas que en las alimentadas. Así pues, el páncreas materno segrega una cantidad de insulina mayor para compensar la degradación de esta hormona por la placenta, pero el aumento de insulina circulante queda compensado por una disminuida sensibilidad de la hormona. Esto permite a la madre mantener una adecuada situación metabólica, pero la predispone a la diabetes, ya que en caso de que el páncreas no tenga suficiente capacidad para mantener esta aumentada secreción de insulina, la resistencia a la misma le puede provocar una hiperglucemia, con grave perjuicio para el feto y para ella misma.

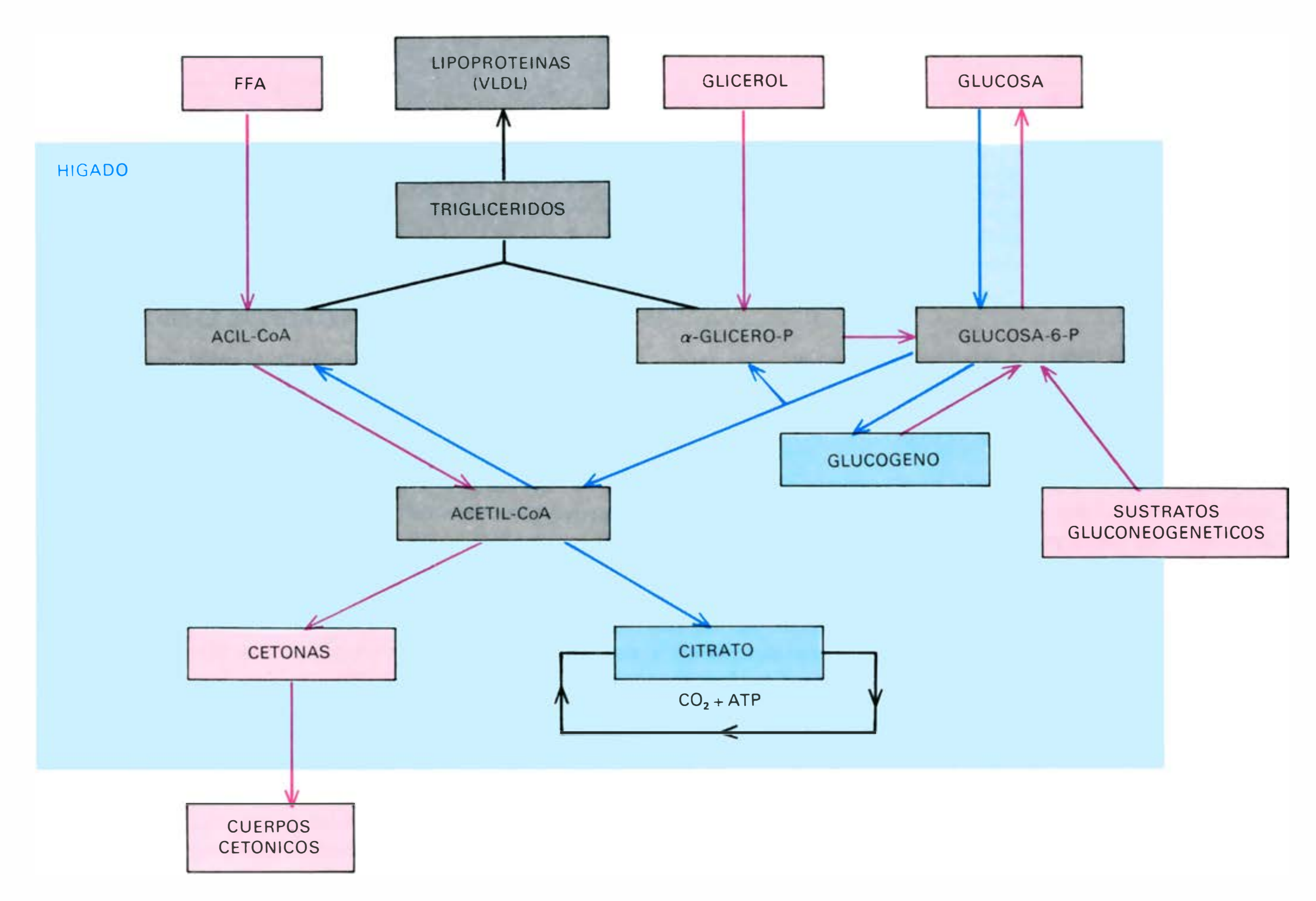
Es lógico pensar que hormonas de efectos "anti-insulínicos" deben también es-

tar aumentadas en la sangre materna, las cuales incidirían, a su vez, en los cambios de sensibilidad a la insulina. Por lo pronto, en el embarazo aparece una nueva glándula, la placenta, que sintetiza y segrega distintas hormonas. Entre ellas se encuentra la hormona denominada "lactógeno placentario", la cual tiene efectos metabólicos similares a una hormona hipofisaria, la hormona del crecimiento. Estos efectos son sustancialmente opuestos a los de la insulina, y de entre ellos cabe destacar una estimulación de la lipolisis en tejido adiposo, lo que podría contribuir a su vez, al activo metabolismo de este tejido durante el embarazo.

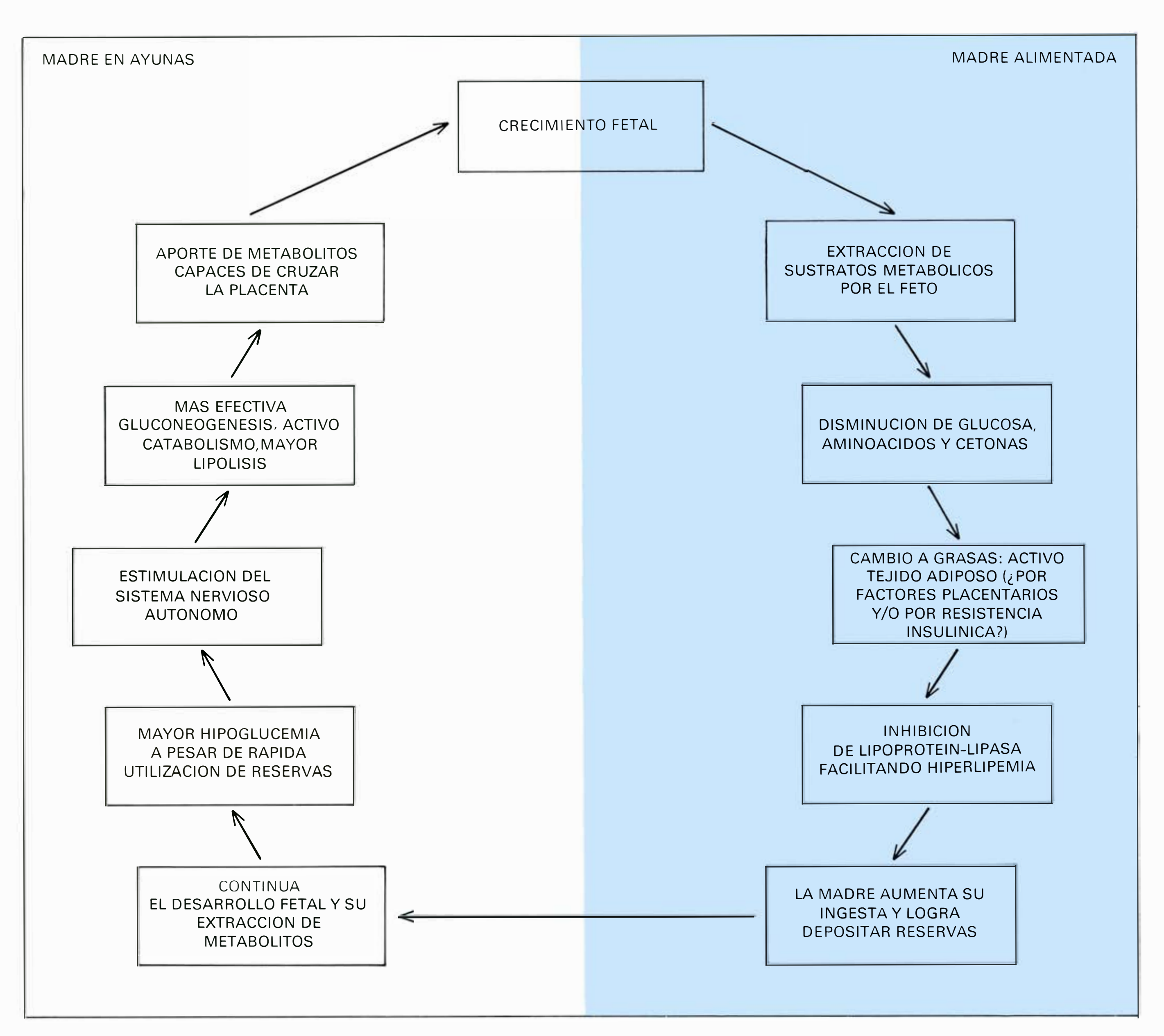
Ante el hecho de que la resistencia a la insulina era especialmente manifiesta en ayunas, decidimos estudiar los niveles de otras hormonas, las catecolaminas (denominadas así por sus características estructurales; son dos, la adrenalina y la noradrenalina), que tienen también efectos anti-insulínicos. Estas hormonas son sintetizadas y segregadas por la médula de las cápsulas suprarrenales y por ciertas terminaciones nerviosas pertenecientes al sistema nervioso autónomo. Se conocía que la hipoglucemia era un estímulo intenso de la secreción de catecolaminas, y precisamente la rata preñada presentaba una disminución de los niveles de glucosa en sangre, especialmente manifiesta tras el ayuno. Nos encontramos que, mientras que la excreción urinaria de catecolaminas era igual en la rata preñada y su control, tras el ayuno aparecía un considerable aumento en la primera con relación a la segunda, lo que ponía de manifiesto una mayor secreción de estas hormonas en aquélla.

El aumento de la secreción de catecolaminas durante el ayuno en la rata preñada puede estar influyendo activamente en el cuadro metabólico que aparece en la madre, ya que los efectos de estas hormonas concuerdan con las alteraciones metabólicas que en aquélla aparecen. Así, las catecolaminas facilitan la lipolisis y la beta-oxidación de los ácidos grasos derivados de ella, por lo que potencian la formación de cuerpos cetónicos, cuyos niveles están enormemente elevados en la madre en ayunas. También estas hormonas activan la gluconeogénesis, por una acción directa sobre ella y por activar el catabolismo proteico, aportando así los aminoácidos utilizados como sustratos. Ya vimos arriba cómo, precisamente en la rata preñada en ayunas, la actividad gluconeogenética era muy superior a la de los controles. Así pues, podemos concluir que la activación del sistema nervioso autónomo en la madre en ayunas, posiblemente derivada de su hipoglucemia, le permite contrarrestar los elevados niveles de insulina circulante y lograr una máxima movilización de sus propias reservas.

Basándonos en lo aquí descrito, podemos resumir las interrelaciones metabólicas durante el embarazo como se indica en la ilustración de la página 24. Cuando la madre está alimentada, el feto extrae de ella glucosa y precursores de la misma, los aminoácidos. Los cuerpos cetónicos también cruzan la placenta y son utilizados por el feto, por lo que sus niveles en la sangre materna también aparecen disminuidos. Esto hace que la madre tenga que cambiar a grasas, y hemos visto cómo la actividad del tejido adiposo



LOS PRINCIPALES EFECTOS de la insulina en el hígado inducen a un acúmulo neto de glucosa en forma de glucógeno, lo cual contribuye a la disminución de aquélla en la sangre. En la figura, las flechas azules corresponden a vías metabólicas activadas por la insulina, y las rojas a vías inhibidas por esta hormona. Los FFA y el glicerol llegan al hígado procedentes de su liberación por lipolisis del tejido adiposo, la cual es inhibida por la insulina. De ahí que la llegada de aquéllos al hígado esté disminuida cuando los niveles de insulina en sangre son altos.



EL CRECIMIENTO FETAL se mantiene ininterrumpido a expensas de la incesante succión de metabolitos de la madre. Esta ha de adaptarse al continuo drenaje de sustratos, lo cual realiza incluso en ayunas, a expensas de una acelerada movilización de sus propias reservas. En esta ilustración se indican los principales cambios que se observan en el metabolismo materno para afrontar esta situación sin dañar su supervivencia.

en la rata preñada está aumentada, posiblemente influida por las hormonas placentarias, así como por la resistencia insulínica. El activo metabolismo lipídico aparece en la madre junto a una inhibición de la actividad de la lipoproteinlipasa, todo lo cual contribuye a su hiperlipemia. La madre aumenta su ingesta, permitiéndole acumular reservas metabólicas, a pesar de la succión fetal.

El ayuno hace que se rompa este equilibrio, ya que el crecimiento fetal permanece inalterado, y ello se realiza a expensas de una máxima degradación materna. De hecho, la madre entra en franca hipoglucemia, lo que, superpuesto a la presencia de los factores lipolíticos de la plancenta, permite una máxima movilización de lípidos. El descenso de la glucemia produce una activación del sistema nervioso autónomo, que se pone de manifiesto por un aumento en la secreción de catecolaminas. Estas hormonas, junto a la aumentada llegada de ácidos grasos al hígado, facilitan una más activa gluconeogénesis y cetogénesis en la madre. Esa gluconeogénesis es, a su vez, mantenida por un activo catabolismo proteico.

Así pues, la madre en ayunas ha de soportar una máxima degradación endógena para el mantenimiento del crecimiento fetal.

Los resultados obtenidos en animales experimentales concuerdan con los datos clínicos, y permiten explicar muchas de las alteraciones metabólicas y endocrinas que se presentan en el embarazo humano. En éste se da incluso la situación del ayuno, como ocurre en aquellas madres en las que el embarazo se desarrolla con frecuentes vómitos, junto con una restricción voluntaria de alimento, para evitar el aumento de peso. En estas circunstancias, el feto continúa su desarrollo y es la madre la que llega a degradar hasta sus propias proteínas tisulares para mantener un ininterrumpido aporte de metabolitos al feto, poniendo en peligro hasta su propia supervivencia.

Estas consideraciones ponen en evidencia el frecuente error de restringir excesivamente la ingesta durante el embarazo, debiendo ser equilibrada, ya que, por otro lado, una sobrealimentación predispone a un aumento del peso fetal y a una mantenida obesidad de la madre.

Ensamblaje controlado por ordenador

Los productos de alto volumen de fabricación se montan manualmente o con máquinas especiales. Un robot programable experimental sugiere que los robots serían rentables en el montaje de productos con bajo volumen de fabricación

James L. Nevins y Daniel E. Whitney

La persistente inflación, la competencia de otros países y los déficit registrados en el comercio internacional han creado en Estados Unidos una conciencia generalizada de la necesidad de aumentar la productividad en la fabricación, lo que significa disminuir las horas-hombre, los materiales, la energía o el capital requeridos para fabricar bienes industriales de todas clases. Un estímulo adicional para aumentar la producción lo constituye el deseo de mejorar la calidad de vida, incluyendo la vida de los operarios que realizan actualmente tareas estúpidas, repetitivas y en ocasiones peligrosas. Durante la mayor parte del siglo pasado, el crecimiento de la productividad en la fabricación se mantuvo gracias a la sustitución de máquinas de transmisión mecánica y a la aplicación de nuevos métodos en el trabajo. Hoy en día se impone emplear energía, materiales y capital de modo más eficiente. Es necesario examinar de nuevo los recursos clásicos y buscar nuevas soluciones.

Si bien existen muchas formas de aumentar la productividad industrial –financieras, fiscales y sociales– debemos concentrarnos aquí en la posibilidad de aumentar la productividad mediante la aplicación de ciencia y de tecnología avanzadas a un antiguo campo: el montaje o ensamblaje. La tecnología ha traído consigo cambios casi radicales en muchos campos –generación de potencia, transporte, fabricación de productos químicos, comunicaciones y proceso de datos–, pero ha incidido poco en la forma de ensamblaje del amplio número de bienes de consumo, desde tostadores eléctricos a automóviles. Varios países, Alemania, Japón, Noruega entre otros, alertados por la necesidad de aumentar la productividad, han iniciado la financiación estatal a largo plazo de la investigación de los métodos de fabricación. En Estados Unidos, la National Science Foundation y unas pocas firmas industriales se asociaron hace varios años para costear estudios semejantes, si bien lo hicieron a una escala más modesta. El estudio único del ensamblaje no sería suficiente.

La parte manual de la fabricación implicada en las operaciones de montaje varía ampliamente de una industria a otra. Rara vez es menor del 10 por ciento, e incluso en la industria automovilística, que posee el tamaño suficiente como para justificar una fuerte inversión en la mecanización, llega a alcanzar aproximadamente un tercio de la fuerza laboral total. Por consiguiente, sólo pueden producirse variaciones masivas en la productividad si se realizan grandes cambios en todo el sistema de fabricación, incluyendo el ensamblaje y afectando a muchas más áreas.

En el momento actual, la fabricación está basada grandemente en la experiencia: es una verdadera forma de arte. Los proyectistas del equipo y los directores de fábrica prefieren repetir una y otra vez todo lo que les ha dado un buen resultado en el pasado, que no aventurarse y tener que luchar contra una nueva situación complicada en sumo grado. Cuando se introduce algún cambio, tiende a ser más bien pequeño y de corto alcance. Las grandes innovaciones en la técnica de fabricación son caras y presentan cierto riesgo.

En el Charles Stark Draper Laboratory, de Cambridge, Mass., Estados Unidos, y con una subvención de la National Science Foundation y de la industria, nuestro objetivo es contribuir al conocimiento básico de la fabricación, que permita la creación de nuevas teorías, técnicas experimentales y métodos de montaje, en lugar de desarrollar aparatos aislados de valor limitado para satisfacer problemas específicos de fabricación. Con la ayuda de nuestros socios industriales hemos desarrollado modelos económicos del papel que desempeña el ensamblaje en la fabricación. De este modo, nuestros estudios pueden centrarse en los problemas de más urgente solución, al mismo tiempo que vamos adquiriendo los conocimientos básicos para resolverlos.

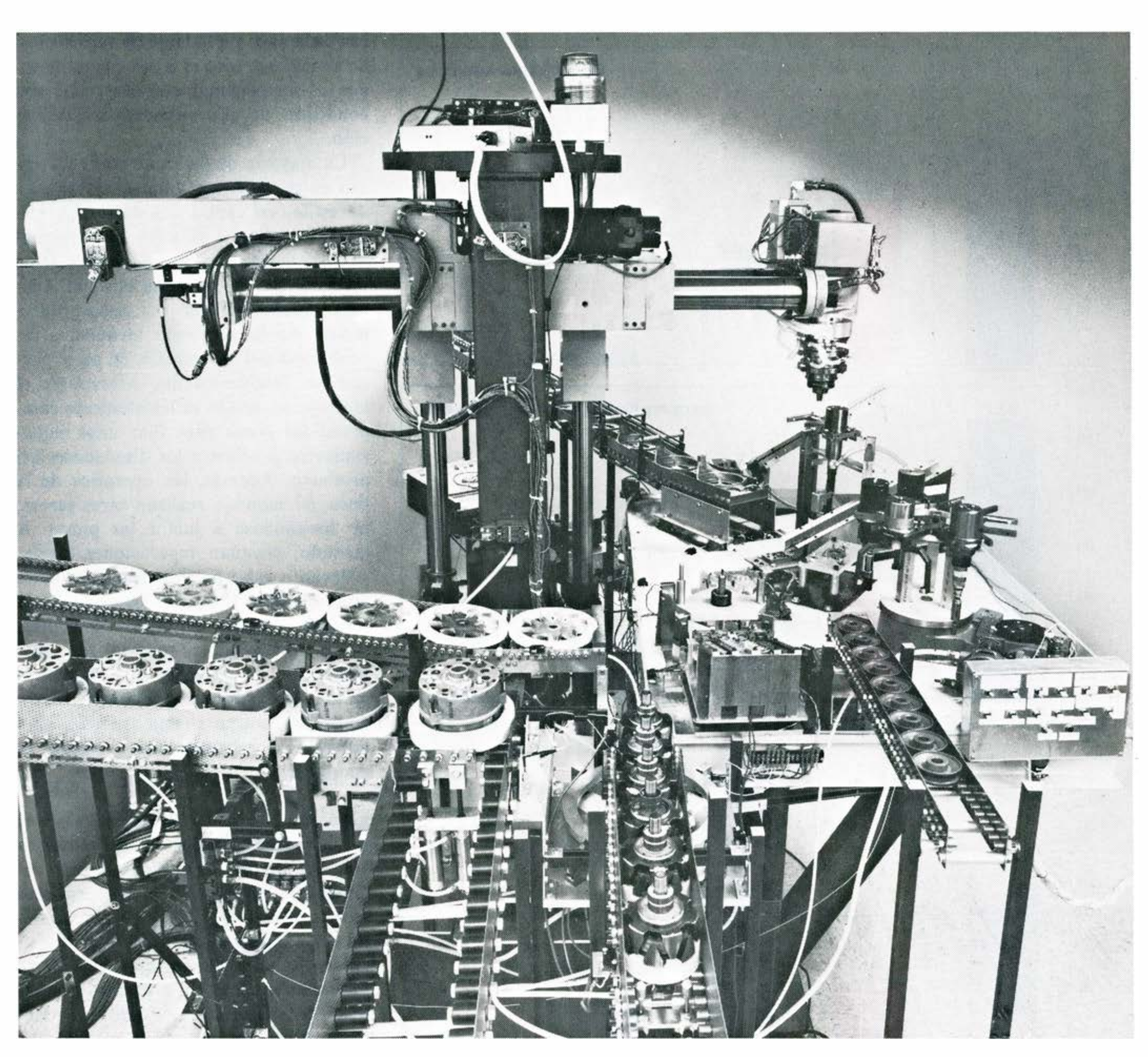
Una lección sacada de este enfoque es que ciertos problemas estudiados en el pasado resultan de poco interés para la industria. Por ejemplo, los mecanismos automáticos de ordenador de elevada complejidad, guiados por "ojos" de televisión, que recogen piezas que llegan con cualquier orientación y que las acoplan a otras piezas orientadas al azar, si bien van variando de posición de forma inteligente, no atacan los problemas esenciales del ensamblaje. ¿Qué ocurre cuando las piezas se tocan unas a otras? ¿Cómo pueden acoplarse piezas que ajustan a tolerancia cuando no hay forma de ver dentro del agujero si han quedado en cuña o descentradas? ¿Qué es lo que debe "saber" una máquina de ensamblaje controlada por ordenador sobre los conocimientos prácticos generales de montaje y qué es lo que debe enseñársele "trabajando" para llevar a

cabo una tarea particular en la planta de la fábrica? ¿Qué productos industriales se prestan al montaje automático? Es preciso responder tajantemente a estas preguntas y a otras semejantes para desarrollar la tecnología de ensamblaje y otras tecnologías de fabricación.

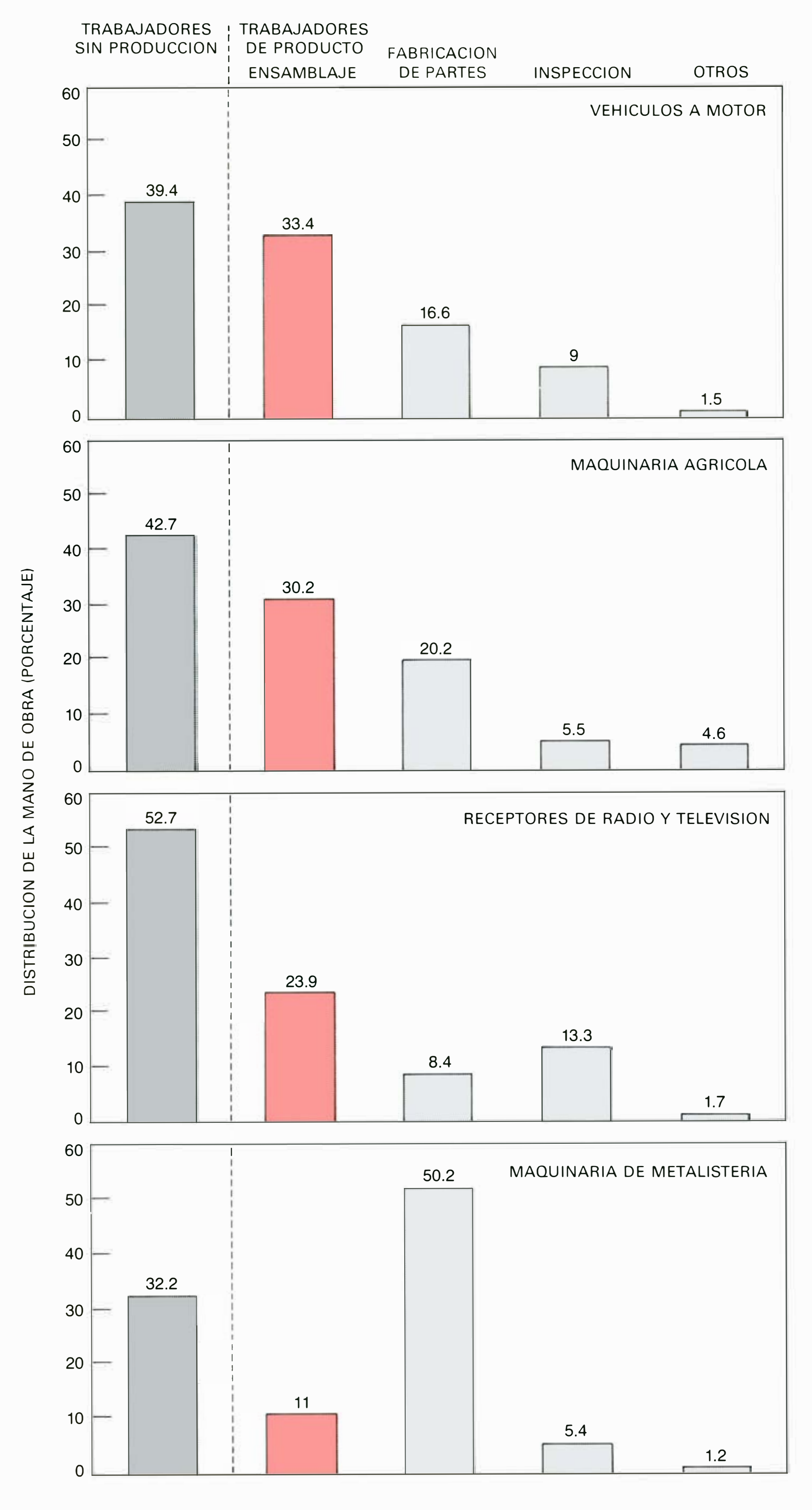
En la actualidad, el personal lleva a cabo el ensamblaje, y sólo cuando el volumen de fabricación es lo suficientemente alto se utilizan máquinas especiales. La gente aprende rápidamente nuevas tareas y se adapta a variaciones (tales como ligeros cambios entre una pieza y la siguiente) de diferentes modelos del mismo producto en la propia línea de montaje y a cambios importantes en el diseño del producto.

Se sirven hábilmente de la vista y del tacto para mover objetos y realizar las tareas delicadas del montaje. Por este motivo, hacen muy poco uso de herramientas especiales y de soportes de piezas (denominados generalmente plantillas y herrajes). Por otro lado, la gente está sujeta a la fatiga y a la falta de capacidad para repetir exactamente una tarea, de la misma forma, todas las veces. Estas limitaciones suelen dar lugar a serios problemas en el control de calidad.

Las máquinas especiales son muy eficientes, dan resultados reproducibles y no se cansan, pero están compuestas casi totalmente por plantillas y herrajes preparados para ejecutar una sola tarea o una serie de tareas estrechamente relacionadas, sobre un producto. No es posible modificarlas fácilmente para acomodar diferentes modelos en la línea de producción o para cambios en el diseño del producto. Este tipo de máquinas no



ESTACION DE ENSAMBLAJE, automática programable, construida en el laboratorio Charles Stark Draper, que puede montar las 17 piezas de un alternador de automóvil en dos minutos y 42 segundos. A la derecha se encuentra una caja de control que permite enseñar al robot una secuencia de movimientos que pueden registrarse en la memoria de un miniordenador. El robot sirve como mesa de ensayo para explorar teorías, técnicas y costes de los sistemas de ensamblaje controlados por ordenador, capaces de ser reprogramados para varias tareas parecidas. Se seleccionó el alternador para el experimento de ensamblaje porque es un producto industrial real, y requiere, por tanto, el apareamiento de las partes componentes que posean tolerancias convencionales. Se escogió también el alternador porque era un producto tipo "bancada", esto es: todas las piezas pueden añadirse de una determinada dirección única. (La fotografía ha sido tomada por Ben Rose.)



LA DISTRIBUCION DE MANO DE OBRA en cuatro industrias principales de bienes duraderos demuestra el papel principal que desempeña todavía el ensamblaje manual, incluso en la industria altamente mecanizada de vehículos a motor. Las diferentes distribuciones son características de las industrias, por ejemplo, el uso intensivo de mano de obra en la fabricación de piezas de precisión de maquinaria de metalistería y en la inspección de receptores de radio y de televisión. Los datos que han permitido la confección del gráfico se han tomado del censo de 1970 en Estados Unidos.

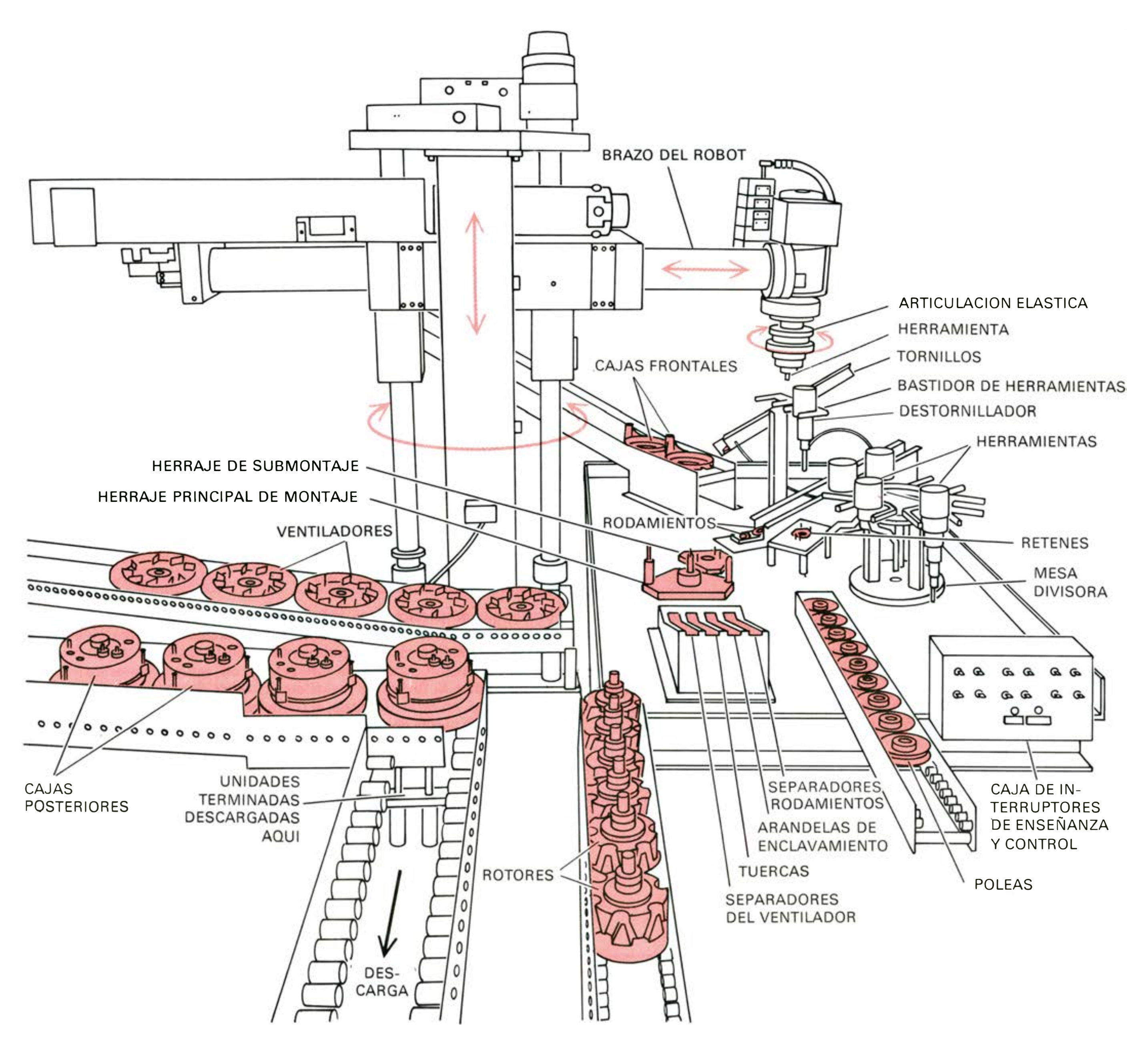
poseen sensores para guiar o monitorizar el proceso de ensamblaje, si bien pueden llevar a cabo ensayos simples en los conjuntos. De ordinario, cada máquina está especialmente fabricada, es cara y se ha ajustado laboriosamente a la precisión necesaria para manejar un conjunto de piezas. Ligeras variaciones en las piezas pueden determinar que las máquinas se traben hasta un tercio del tiempo de su funcionamiento. El alto coste de estas máquinas especiales y su incapacidad para ejecutar nuevas tareas, o para manejar nuevos productos, limita su aplicación a las plantas industriales en donde se fabrican millones de unidades idénticas cada año, y a lo largo de varios años. Se estima que sólo el 5 por ciento de todos los bienes manufacturados reúne esta condición de alto volumen de fabricación.

La mayoría de los productos se fabrican en partidas con amplias variaciones de estilo, en cantidades demasiado pequeñas o con una vida útil excesivamente corta, como para justificar el coste de inversión de una máquina especial. Además, muchos artículos no están proyectados con la suficiente atención a los problemas del ensamblaje, en parte porque los fenómenos que ocurren en el montaje no son lo suficientemente comprendidos como para fijar unos requerimientos precisos a los diseñadores del producto. Además, los operarios de la línea de montaje realizan otras tareas, no limitándose a juntar las piezas. A menudo, efectúan reparaciones locales y llevan a cabo muchos trabajos vitales de inspección. Estos son los motivos por los que la mayor parte del ensamblaje siguen realizándolo todavía los operarios. No es probable que lleguen a existir las fábricas totalmente automatizadas, porque siempre se precisarán operarios para supervisar y reparar la maquinaria.

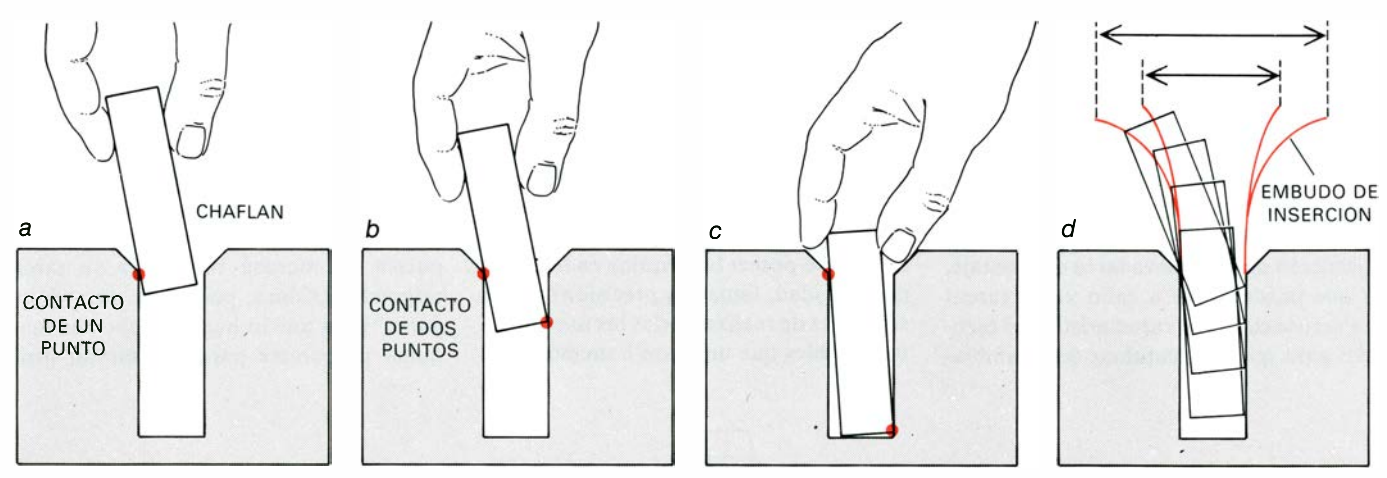
Nuestro grupo de investigación en el laboratorio Draper ha examinado la hipótesis de que las partidas de bajo volumen de fabricación de un producto (varios cientos de miles por año o inferiores) y partidas mixtas de modelos similares de un producto puedan montarse provechosamente por máquinas adaptables y programables. Una máquina adaptable es aquella que puede realizar una tarea de ensamblaje, acomodándose por sí misma a los errores relativos de posición entre las piezas. Tales errores provienen de las tolerancias de variación usuales para las piezas fabricadas y del comportamiento de la propia máquina

de ensamblaje que no es perfectamente repetitivo. Estos errores son los causantes de que las piezas se interfieran, en lugar de acoplarse suavemente. Por tanto, la adaptabilidad es básica para un montaje bien realizado. Una máquina programable es aquella a la que se puede enseñar, con alteraciones mínimas, la ejecución de una nueva tarea de montaje, o que puede llevar a cabo varias tareas en secuencia. Esta característica es esencial para que las máquinas de ensamblaje resulten económicas en una fabricación de bajo volumen.

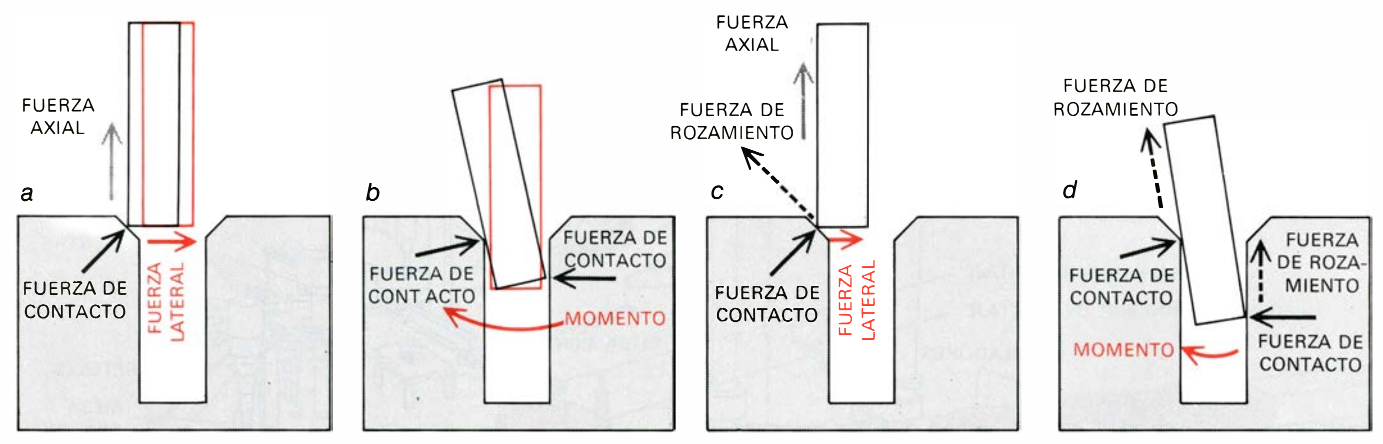
Antes de acordar diseñar una máquina de ensamblaje adaptable y programable, es necesario responder a varias preguntas. ¿Con qué tareas de montaje se enfrentará la máquina, o bien, qué tareas son las más adecuadas? ¿Qué características debe poseer la máquina en términos de velocidad, tamaño y precisión? ¿Debe ser capaz de realizar todos los movimientos posibles que un brazo humano puede ejecutar, o más o menos movimientos –bastos y finos incluidos–? ¿Debe poseer la máquina dispositivos eficientes pero inflexibles, o bien características sensibles de reenseñanza elaborada que permitan determinar la posición exacta de las piezas? Si la máquina debe ser programable, ¿no puede construirse para que desde su puesta en marcha realice ya su tarea asignada? ¿Cómo, pues, hay que "enseñarle" para que lo haga? ¿Debe una máquina prepararse para montar un pro-



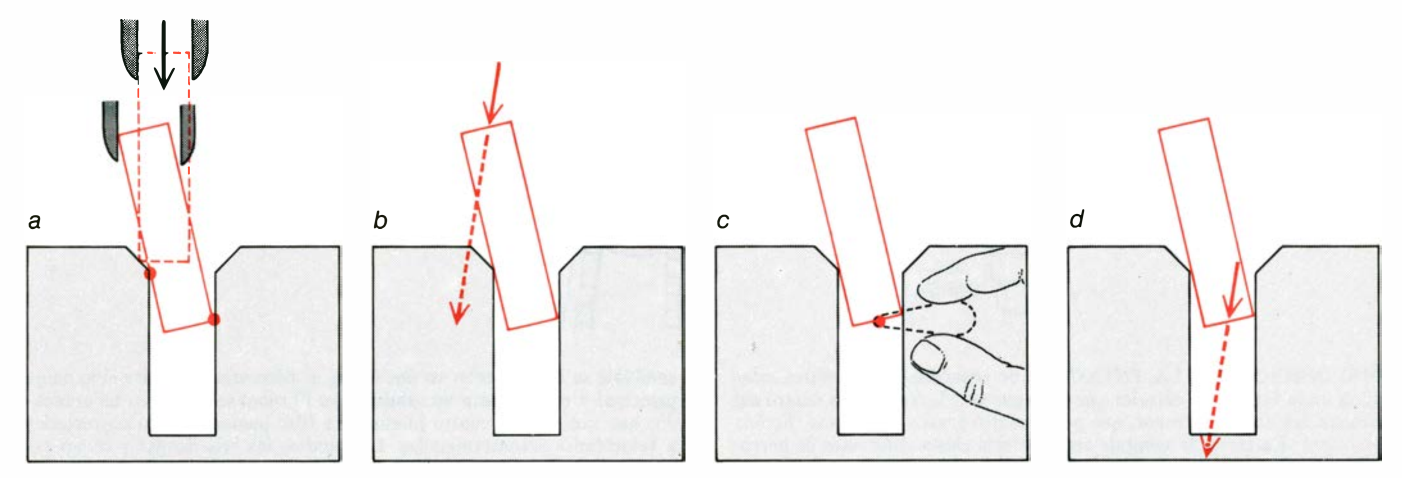
DISPOSICION DE LA ESTACION de ensamblaje automática mostrada en la fotografía anterior que sitúa partes y herramientas dentro del alcance del brazo del robot, que posee cuatro grados de libertad *(flechas en color)*. La tarea de montaje requiere seis clases diferentes de herramientas, fijadas a una mesa que "divide" o gira, para proporcionar la herramienta adecuada en cada operación. Las 17 partes del alternador se alimentan por gravedad desde 12 dispositivos alimentadores. (Las 17 piezas incluyen tres tornillos, que tienen un solo alimentador, y tres pernos largos, alimentados conjuntamente con la caja posterior.) El ensamblaje se lleva a cabo en dos herrajes diferentes, uno para el montaje principal y el otro para un submontaje. El robot se opera por un ordenador que acciona las cuatro juntas para fijar puntos de paro proyectados a velocidades predeterminadas. Los puntos, las velocidades y las operaciones de la herramienta están programados con la ayuda de una caja de control y un lenguaje simple de tablero. El lenguaje identifica y ordena los puntos y las operaciones de la herramienta. El robot posee un mecanismo de articulación y de mordaza que responde elásticamente, y así las piezas se insertan en aberturas de estrecho acoplamiento sin trabarse.



INSERCION DE UNA ESPIGA dentro de un agujero, tarea típica de ensamblaje, que es básicamente un problema de posicionamiento. Los agujeros están usualmente biselados (achaflanados alrededor del borde) para facilitar la inserción. Al deslizar la espiga dentro del chaflán, y entrar en el agujero *(a)*, toca primero un lado del interior (contacto en un punto). Si el desalineamiento angular es grande *(b)*, la espiga tocará en seguida el lado opuesto del agujero (contacto en dos puntos) con el riesgo de trabarse. En el ensamblaje manual, la vista puede ayudar para encontrar el chaflán, pero una vez la espiga ha entrado dentro del agujero, es necesario confiar en la habilidad para captar las fuerzas de resistencia y maniobrar la espiga hasta el fondo del mismo *(c)*. La forma geométrica de la espiga y del agujero mantiene la espiga dentro del "embudo" de inserción *(d)*, es decir, la trayectoria trazada por la parte superior de la espiga en las etapas sucesivamente más profundas del contacto de dos puntos. Cuanto más pequeña sea la tolerancia entre la espiga y el agujero, más estrecho será el embudo de inserción y más difícil la tarea de inserción.



LAS FUERZAS DE CONTACTO entre las piezas pueden utilizarse para guiar los movimientos de corrección de la "articulación" de un brazo de robot de ensamblaje. En la ausencia de rozamientos *(a)*, se capta la fuerza de contacto en el chaflán como dos reacciones iguales, una vertical y otra lateral. La fuerza lateral puede emplearse como una indicación del movimiento de corrección deseado *(flecha en color)*. A continuación *(b)*, las fuerzas de contacto crean un momento alrededor de la punta, que proporciona una indicación del movimiento de corrección deseado *(flecha en color)*. Cuando existe rozamiento *(c)*, la reacción hacia arriba del chaflán es exagerada, reduciendo la reacción lateral útil. El rozamiento reduce también la información útil sobre el momento *(d)*. La relación entre la fuerza de rozamiento *(flechas discontinuas)* y la fuerza de contacto, en otros términos, el coeficiente de rozamiento, vale alrededor de 0,2 en piezas de acero y oscila en torno a 1,0 en piezas de aluminio.



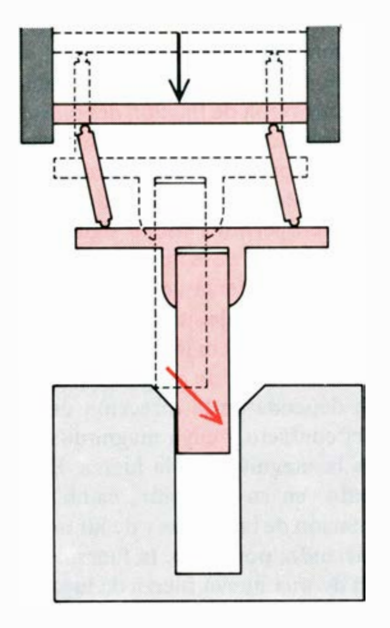
SI LAS MORDAZAS ELASTICAS se emplean para sostener una espiga, un error lateral se convierte en un error angular al deslizar la espiga hacia abajo del chaflán y entrar en el agujero *(a)*. La aplicación continuada de la fuerza en la punta de la espiga *(b)* crea un par que puede conducir al recuñamiento. Si la punta de la espiga pudiera agarrarse elásticamente *(c)*, la inserción podría lograrse a pesar del error angular. La fuerza que, aplicada en la parte superior de la espiga, provocaría el recuñamiento, tendería a no causarlo si se aplicara en la parte inferior *(d)*.

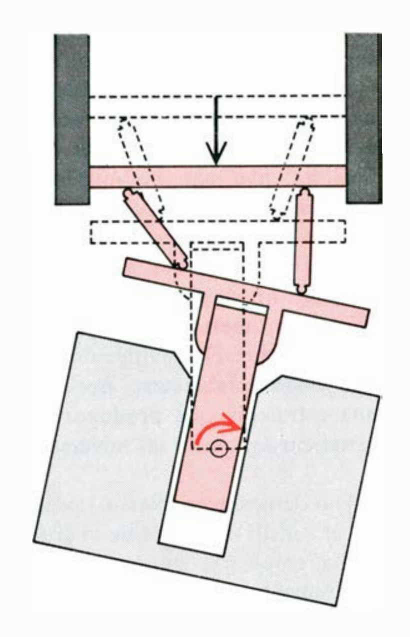
ducto completo o deben repartirse las tareas asignadas entre varias máquinas que transfieren trabajo parcialmente terminado, como ocurre en una línea de montaje al uso?

Estas preguntas tienen respuestas plausibles, pero al mismo tiempo conflictivas. En nuestro enfoque hemos dividido el problema en dos partes: los fenómenos de acoplamiento de piezas y los sistemas de ensamblaje. El acoplamiento de piezas engloba todos los acontecimientos que se presentan cuando éstas entran en contacto y avanzan conjuntamente. Tales acontecimientos dependen de la forma geométrica de las piezas, en particular del grado de tolerancia (o espacio libre) entre ellas después del montaje, del grado en que se desalinean lateral y angularmente al primer encuentro, y de la influencia de las fuerzas de contacto y de rozamiento mutuas al ir deslizando conjuntamente. Con el afán de comprender el ajuste de las piezas, hemos estudiado tareas ideales, hemos formulado hipótesis y las hemos sometido a verificación experimental. Cuando empezamos este trabajo, hace cinco años, partimos de varias hipótesis adicionales, algunas de las cuales han continuado siendo válidas y otras se fueron derrumbando. Postulamos sistemas de maquinaria con varias estaciones de trabajo, incorporando cada una un "brazo" parecido al robot industrial actual (véase "Sistemas robot", por James S. Albus y John M. Evans, Jr.; INVESTIGACION Y CIENCIA, octubre, 1976). Tales aparatos repiten una secuencia de movimientos enseñados, combinados con la apertura y el cierre de mordazas, que permiten transferir objetos de un lugar a otro. Los robots industriales normales no poseen controles o sensores sofisticados que, en caso de dificultad, permitan una modificación del comportamiento, si bien pueden detectar una anomalía y pararse antes de que se produzca ningún daño. Ninguna de estas máquinas son lo suficientemente precisas como para realizar el montaje. Muchas de estas limitaciones se están resolviendo ya, o se solucionarán pronto, gracias a la investigación y a nuevos diseños. Los robots actuales, sin embargo, son demasiado grandes y demasiado caros para la mayoría de las aplicaciones de ensamblaje, y queda por aclarar que estas aplicaciones requieran realmente todos los movimientos que son capaces de acometer.

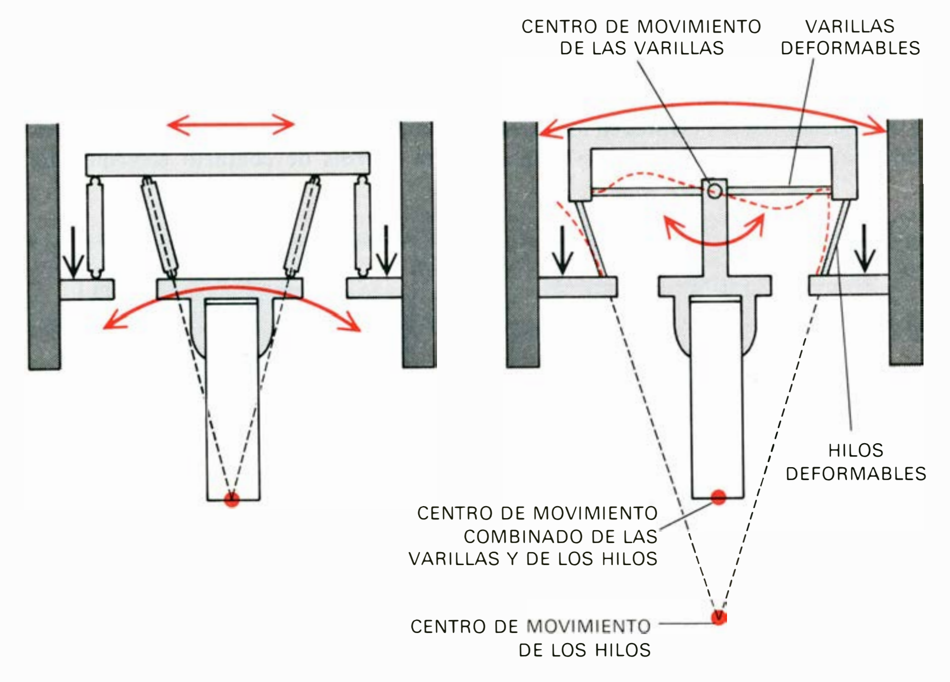
Expusimos ulteriormente que el brazo de cada estación de trabajo debía ser capaz de ejecutar movimientos bastos para la transferencia de piezas y, movimientos finos, medidos en fracciones de centímetro, para el ensamblaje de las piezas. Al objeto de guiar los movimientos finos, propusimos colocar en la "articulación" del brazo un sensor capaz de detectar a la vez fuerzas y momentos. Llegamos pronto a la conclusión de que la información espacial, necesaria para colocar conjuntamente piezas ajustadas, podía obtenerse en forma de fuerzas físicas mucho más rápidamente de lo que podía lograrse mediante mecanismos de visión, como sería la televisión.

El que las piezas se apareen o ajusten con éxito en cualquier instante dado depende del error relativo entre las piezas





LAS MORDAZAS CON SOPORTES DE VARILLA pueden proporcionar la respuesta adecuada a un error ya sea en posición lateral *(izquierda)* o en posición angular *(derecha)*, pero no en ambas posiciones a la vez. La primera varilla permite que una espiga desalineada lateralmente deslice por el chaflán y entre en el agujero sin girar. La segunda varilla permite que una espiga que se encuentre desalineada pueda alinearse mediante giro de la punta, sin necesidad de movimiento lateral.



LAS MORDAZAS CON UNA COMBINACION ELASTICA pueden corregir ambos desalineamientos: el lateral y el angular. El "centro remoto de adaptabilidad", a la izquierda, combina ambos tipos de varillaje descritos en la ilustración superior. Si se ejerce una fuerza lateral en la punta de la espiga, se traslada (se mueve lateralmente) sin girar. Si se ejerce un par en la punta, la espiga girará sin trasladarse. El dispositivo representado a la derecha puede corregir los desalineamientos mediante una disposición adecuada de varillas deformables y resortes de alambre. La rigidez relativa de las varillas y de los hilos determina la localización del centro combinado del movimiento.

en el momento en que entran en contacto por primera vez. Si las piezas se tocan con algún error relativo, se presenta una fuerza de contacto que da lugar a que las piezas, o bien las mordazas y las plantillas, se deformen ligeramente. La deformación causa la alteración de la línea de movimiento de la pieza de llegada, lo que se traduce en un factor adverso, beneficioso o neutro. Si el error relativo es pequeño, el apareamiento puede proseguir sin dificultad, pero los efectos adversos crecerán, con seguridad, conforme vayan aumentando los errores. Para evitar la adición de herrajes caros e inflexibles, nuestros mecanismos de acoplamiento deben ser capaces de tolerar errores mucho mayores que los tolerados por las máquinas existentes. Este requerimiento no significa puramente que debe dejarse libertad a las fuerzas de contacto durante el movimiento, antes bien que debe establecerse por anticipado una estrategia que produzca respuestas beneficiosas y evite las adversas.

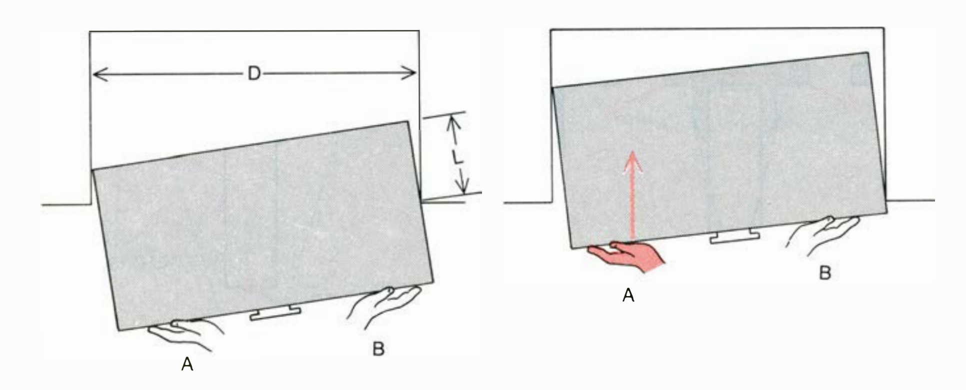
Uno de nosotros (Nevins) propuso que el sensor de fuerza de la articulación podía emplearse para medir todos los componentes del vector de la fuerza de contacto. El sensor se proyectaría para medir tres componentes de la fuerza a lo largo de tres ejes mutuamente perpendiculares *x*, *y* y *z*, conjuntamente con tres componentes del par alrededor de los mismos ejes. Por consiguiente, propusimos ejecutar el ensamblaje como podría realizarlo un ciego, midiendo las fuerzas y efectuando los movimientos adecuados en respuesta a los parámetros detectados y corrigiendo así los errores en forma escalonada hasta que las piezas se acoplaran con éxito. A continuación, el otro firmante de este artículo (Whitney) formuló una estrategia general para utilizar la fuerza de realimentación que genera un vector de movimientos (tres traslaciones *x y z* y tres rotaciones alrededor de los ejes *x y z* de la punta de la pieza entrante) en respuesta al vector detectado de la fuerza de contacto.

Analizamos esta técnica y la verificamos experimentalmente en dos robots distintos controlados por ordenador; el proceso nos sirvió de mucho para comprender el armazón de fijación del sensor de realimentación para el ensamblaje. Esta técnica posee bastantes características de un sistema de control de bucle cerrado, que opera del modo siguiente. El sensor de fuerza de la articulación detecta el vector de fuerza del contacto. El sistema del ensamblaje situado en el controlador del brazo demandará un determinado movimiento de respuesta, cuya dirección depende de la dirección de la fuerza del contacto y cuya magnitud depende de la magnitud de la fuerza. Este movimiento, en su ejecución, cambiará la deformación de las piezas y de las mordazas, variando, por tanto, la fuerza. La aparición de una nueva fuerza da lugar a nuevos movimientos, que a su vez generan una nueva fuerza, y así sucesivamente dentro del bucle de control.

Es necesario tener sumo cuidado al proyectar el sistema para que, en respuesta a la fuerza captada, aparezca el grado de movimiento justo. Un movimiento excesivo dará lugar a que el brazo reaccione como haría una persona al tocar una superficie caliente; un movimiento que peque por defecto desarrollará fuerzas de contacto elevadas que podrían alcanzar un nivel peligroso. Cuanto menos rígidas (más elásticas) sean las piezas y las mordazas, y cuanto más ligeros sean los componentes del movimiento del brazo, más fácil será obtener respuestas rápidas, estables y eficaces con bajas fuerzas de contacto. Cuando es imposible incluir dentro del aparato un movimiento de baja rigidez y respuesta rápida (verbigracia, porque el aparato sea demasiado pesado o porque lo sean las piezas a trabajar) el único remedio para evitar grandes fuerzas de contacto estriba en hacer que los movimientos del bucle cerrado sean lentos. Desde un punto de vista económico, esta alternativa carece de incentivo.

Una de las conclusiones sacadas de este trabajo fue que el ensamblaje se comprendía mejor analizándolo en función de las fuerzas y de los momentos que actúan en la parte superior de la pieza, en donde ésta entra en contacto con su homónima durante la operación del ensamblaje. Otra de las conclusiones fue que los aparatos capaces de movimientos finos de montaje debían ser pequeños, ligeros y rápidos. Los brazos capaces de movimientos bastos no pueden satisfacer estos criterios, lo cual pone de manifiesto que, en los sistemas de ensamblaje futuros, los aparatos de movimientos finos y bastos, análogamente a como sucede con la mano y el brazo del hombre, serán completamente distintos.

Una tercera conclusión fue que el rozamiento puede enmascarar los datos de fuerza necesarios para guiar el sistema y puede dar lugar a que las piezas se traben en lugar de deslizar conjuntamente. Nuestro colaborador Sergio N. Simunovic ha demostrado matemáticamente que en realidad existen dos fenómenos diferenciados: recuñado y descentramiento. El recuñado implica deformación de las propias piezas, y sólo se presenta si la pieza entrante, una espiga por ejemplo, entra en un agujero con un ángulo brusco, de suerte que toca los lados opuestos del agujero antes de haber penetrado mucho. Más específicamente, el recuñado ocurre cuando la relación entre la profundidad de la inserción y el diámetro del agujero es menor que el coeficiente de rozamiento; la relación es típicamente inferior a 0,2. No se conoce ningún remedio para el recuñado, si exceptuamos el sacar la espiga fuera y probar de nuevo.



LA DIFERENCIA ENTRE RECUÑAMIENTO Y DESCENTRAMIENTO quedó clarificada durante el desarrollo de los mecanismos de mordaza elástica. Así, cuando un cajón de mesa se traba *(izquierda)*, resultará literalmente bloqueado. Cualquier esfuerzo adicional deformará el cajón, o bien la mesa, o ambos. La teoría muestra que el recuñamiento aparece cuando el cajón está insertado en un ángulo tal que la relación L/D es menor que el coeficiente de rozamiento (μ), en el momento en que se presenta el contacto en dos puntos. El único remedio es tirar el cajón hacia fuera y empezar de nuevo. Sin embargo, si la relación L/D es mayor que μ, en el instante inicial del contacto de dos puntos *(derecha)*, el recuñamiento no puede presentarse, si bien el movimiento ulterior puede quedar frenado por el descentramiento. La solución es romper el contacto de dos puntos empujando en *A*, cambiando, por tanto, la dirección simultánea de la fuerza y del momento aplicados.

Por otro lado, el descentramiento nace principalmente por la relación entre la fuerza de inserción y las fuerzas de rozamiento. Puede solucionarse cambiando la dirección del vector de la fuerza de

CABEZAL DE MAQUINA FRESADORA
SENSOR DE FUERZA DE SEIS EJES
DATOS AL ORDENADOR
VARILLA ELASTICA
ESPIGA Y AGUJERO DE ENSAYO CALIBRADOS

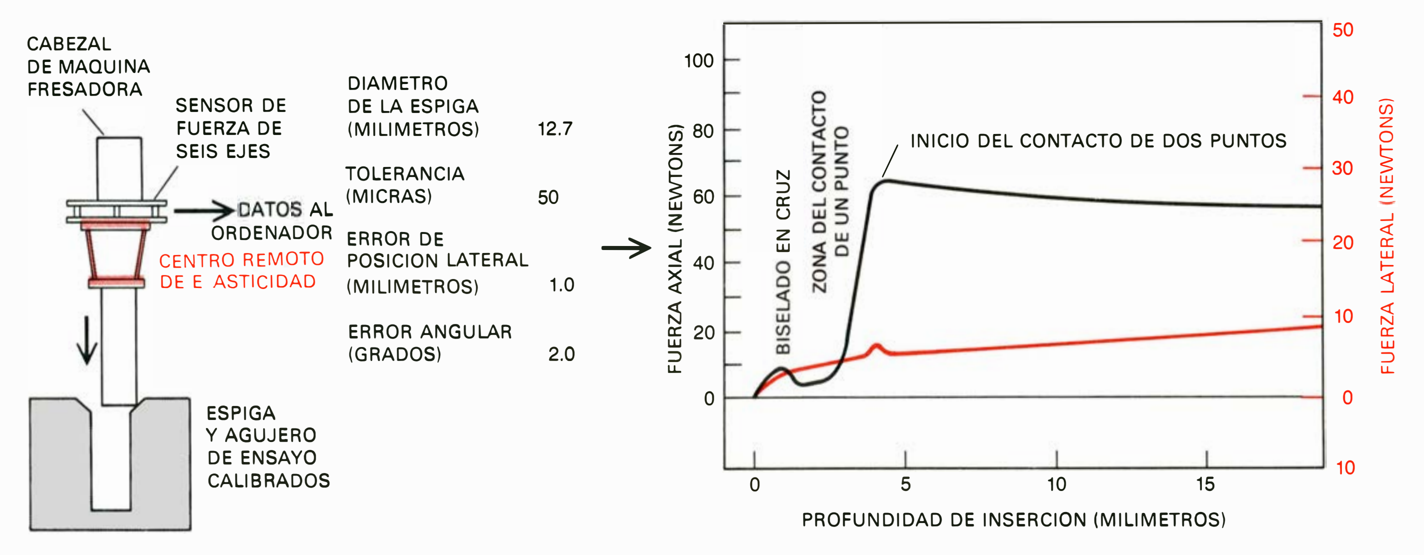
DIAMETRO DE LA ESPIGA (MILIMETROS)	12.7
TOLERANCIA (MICRAS)	50
ERROR DE POSICION LATERAL (MILIMETROS)	.6
ERROR ANGULAR (GRADOS)	0

FUERZA AXIAL (NEWTONS)
FUERZA LATERAL (NEWTONS)
BISELADO EN CRUZ
INICIO DEL CONTACTO DE DOS PUNTOS
ZONA DEL CONTACTO DE UN PUNTO
PROFUNDIDAD DE INSERCION (MILIMETROS)

DIAMETRO DE LA ESPIGA (MILIMETROS)	12.7
TOLERANCIA (MICRAS)	25
ERROR DE POSICION LATERAL (MILIMETROS)	.4
ERROR ANGULAR (GRADOS)	.18

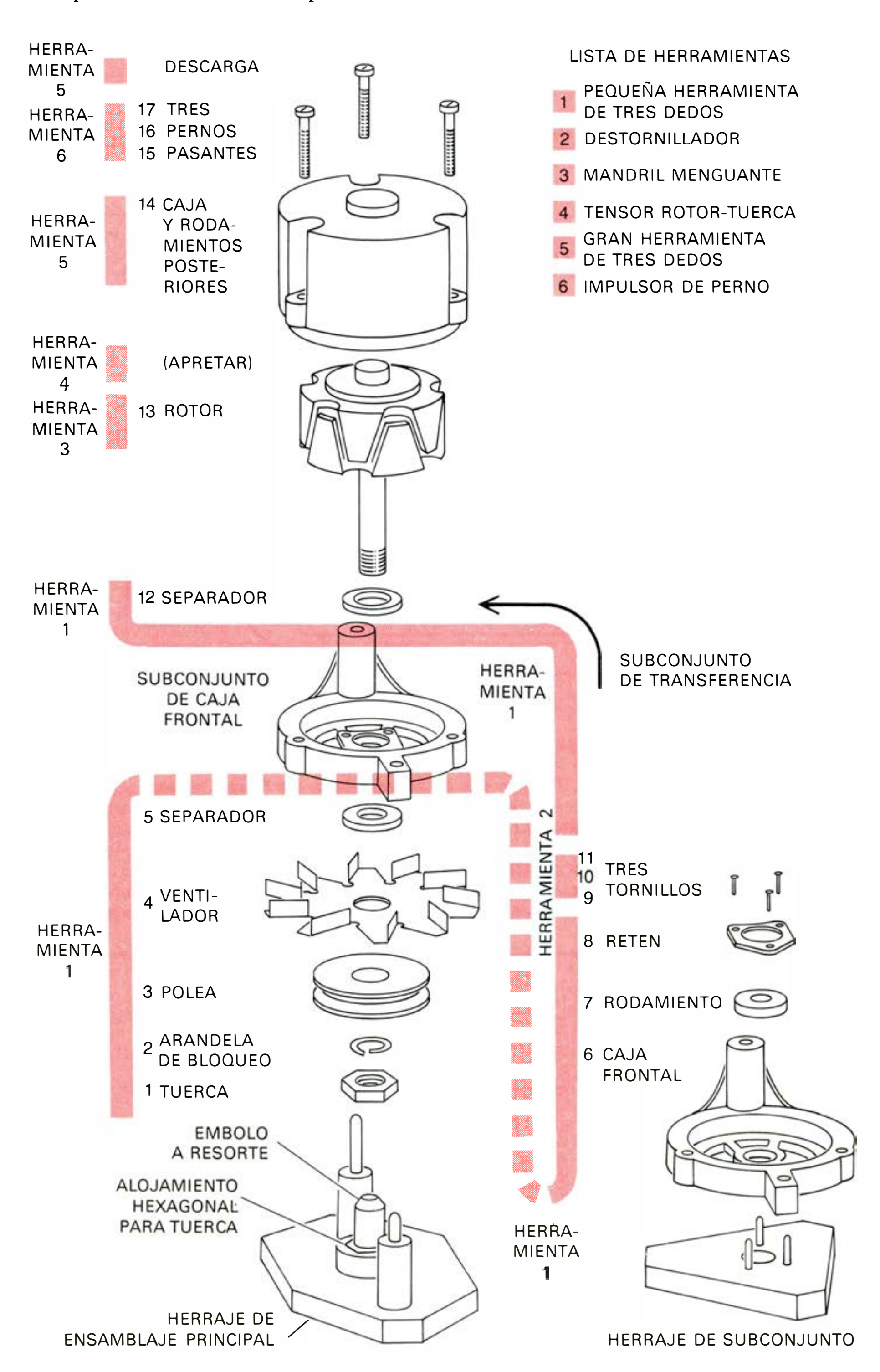
FUERZA AXIAL (NEWTONS)
FUERZA LATERAL (NEWTONS)
BISELADO EN CRUZ
INICIO DEL CONTACTO DE DOS PUNTOS
ZONA DEL CONTACTO DE UN PUNTO
FUERZA A LA IZQUIERDA
FUERZA A LA DERECHA
PROFUNDIDAD DE INSERCION (MILIMETROS)

EXPERIMENTOS DE APAREAMIENTO DE PIEZAS. Ellos ponen de manifiesto las fuerzas que se desarrollan cuando una espiga de acero se inserta en un agujero en condiciones de tolerancia y desalineamiento cuidadosamente calibradas. Se detectan las fuerzas y los momentos y transmiten a un ordenador por un sensor de fuerza de seis ejes fijado a la cabeza de una máquina fresadora. Una sencilla varilla elástica proporciona una elasticidad limitada entre el sensor de fuerza y la espiga de ensayo. En este par de experimentos, las fuerzas axiales aumentaron bruscamente, casi en un mismo valor, una vez se efectuó el contacto en dos puntos. El comportamiento de la fuerza lateral en el segundo experimento (primero empujando a la derecha y a continuación a la izquierda) es característico de los errores lateral y angular combinados. Los resultados que llegaron a obtenerse en los experimentos de apareamiento de piezas concordaron puntualmente con las predicciones teóricas esbozadas.



LOS DESALINEAMIENTOS MUCHO MAYORES entre una espiga y un agujero se toleran y generan fuerzas axiales y laterales más pequeñas, siempre que la espiga se mantenga mediante el centro remoto elástico desarrollado recientemente, en lugar de utilizar una varilla. En este experimento, el error inicial en la posición lateral equivale aproximadamente al doble del valor del error en los experimentos de varilla elástica. El error angular de dos grados es más de cinco veces mayor que el determinado en el segundo experimento de varilla. La virtud del nuevo esquema clástico es que permite que la espiga gire alrededor de su punta al ir encontrando resistencia conforme penetra en el agujero. La espiga no se descentra, ni siquiera cuando el contacto de dos puntos entre ella y el agujero se efectúe cerca de la parte superior del agujero.

inserción aplicada. Simunovic dedujo una estrategia cuantitativa que ha sido verificada experimentalmente, a saber: captar las fuerzas aplicadas y mover el brazo bajo control de ordenador a fin de satisfacer ciertas relaciones entre los componentes de la fuerza aplicada. Este enfoque es eficaz y general, pero puede resultar caro de instrumentar en un aparato de ensamblaje. Al igual que a otros investigadores, a nosotros nos pareció de indudable utilidad al tener que habérnoslas en casa con cajones rebeldes y marcos de ventana.



DESARROLLO DEL ALTERNADOR. **Muestra la secuencia en la que sus 17 piezas se montan por el robot programable del autor, e identifica las herramientas que ejecutan cada tarea. La varilla central en el herraje de ensamblaje principal es un émbolo con resorte. El collar de la base de la varilla contiene una cavidad hexagonal que sujeta firmemente la pieza *1*, la tuerca. Cuando se inserta el rotor *(13)*, se tensa el émbolo, permitiendo que el eje de rosca del rotor enganche la tuerca. A continuación, se gira el rotor por la herramienta *4*, para que su eje enrosque en la tuerca. El tiempo requerido para la operación actual de dos minutos y 42 segundos podría reducirse a un minuto y cinco segundos si se realizaran cambios en el diseño de las herramientas, herrajes y en el alternador.**

Llevamos a cabo otro experimento clarificador, empleando robots al uso en la industria que carecían de fuerza de realimentación; nos apoyábamos solamente en su capacidad para repetir una tarea enseñada dentro de una tolerancia de medio milímetro. Donald S. Seltzer, de nuestro grupo, enseñó a un robot a insertar un eje de cigüeñal y un tren de engranajes dentro del cárter de un pequeño motor de gasolina con tolerancias estrechas, verbigracia de 0,05 mm; una décima de la precisión del robot. En un principio quedamos sorprendidos por su éxito, pero un examen más detenido nos dio la explicación. Cuando una espiga está parcialmente introducida dentro de un agujero, puede variar de posición en uno u otro sentido mucho más que el valor de la propia tolerancia. Merced a una adaptabilidad incidental e inapreciable en el brazo y en las mordazas, se permitía que ocurriera esta irregularidad, con lo que las piezas se apareaban conjuntamente. Sin duda, las fuerzas de contacto eran de gran valor.

¿Es posible que las tareas de inserción sencillas espiga-agujero se realicen de este modo? La respuesta es "Sí, pero..." El ingeniero precisa estar seguro de que su máquina funcionará. En este caso necesita saber el grado de "bailoteo" que puede esperar y cómo disponer las adaptabilidades del sistema para que no se presente el descentramiento. El no puede depender de la elasticidad accidental de las mordazas. Al objeto de mejorar nuestros conocimientos acerca de estos efectos, llevamos a cabo un programa experimental y teórico de análisis geométrico de las tareas de ensamblaje, combinando los resultados con otro análisis de descentramiento. Nos proponíamos crear una articulación elástica pasiva que pudiera ejecutar los movimientos finos requeridos para las inserciones de tolerancia estrecha, sin el empleo de sensores y actuadores activos. La investigación estuvo dirigida por Paul C. Watson, Samuel Drake y Simunovic.

Los métodos de estudio de tiempo tradicionales distinguen cualitativamente tareas de inserción manuales "fácil" y "difícil", pero nosotros necesitábamos una descripción que fuera cuantitativa. La encontramos determinando el grado de variación de posición de una espiga en un agujero en función de la profundidad de la inserción, el diámetro del agujero y la tolerancia. Los resultados del análisis vienen expresados en función de relaciones, de modo que pueden aplicarse a todos los tamaños de espigas y agujeros. La dificultad de la tarea viene

expresada en función de la razón de tolerancia (la tolerancia dividida por el diámetro). Observamos que la mayoría de las piezas de una clase dada (por ejemplo, arandelas o rodamientos) están proyectadas para una relación de tolerancia particular, en la que apenas importa su tamaño.

Este descubrimiento nos permite predecir la dificultad de inserción de muchas tareas industriales de ensamblaje. Es típica la razón de tolerancia de 0,001 para una dificultad de inserción clara. En este caso, una espiga insertada en una profundidad igual a un diámetro puede bailar en ambos sentidos alrededor de 0,06 grados. La misma espiga, que entrará ajustadamente dentro del agujero puede variar en unos 1,5 grados. Al comparar este resultado con la precisión angular requerida para iniciar el roscado de tornillos dentro de agujeros roscados, sin perjudicar la rosca en los lados opuestos del agujero, descubrimos que cabía una amplia variación. Llegamos a la conclusión de que las máquinas con suficiente precisión para realizar la mayor parte de las inserciones, también pueden instalar tornillos.

Drake, con la ayuda de Seltzer, efectuó una serie de experimentos controlados con espigas metálicas y agujeros redondos, medidos cuidadosamente, para someter a corroboración los análisis geométricos y de rozamiento. La espiga y el agujero se montaron en una fresadora de modo que, durante la inserción de la espiga, podían imponerse errores relativos precisos. La espiga estaba fijada a un sensor que medía fuerzas y pares a lo largo de tres ejes en la región superior de la espiga. A fin de proporcionar un valor conocido de adaptabilidad, la región superior de la espiga se hallaba fijada al sensor por medio de una delgada varilla metálica.

El experimento puso de manifiesto que había que mejorar, doblemente, la varilla de adaptabilidad. Al continuar la inserción, con la espiga pivotada desde su extremo superior, existe una tendencia que convierte el error lateral en error angular. Esta tendencia da lugar a un contacto de dos puntos, y la inserción ulterior es sólo posible si la parte superior de la espiga admite un movimiento lateral. El componente adaptable debe ser lo suficientemente flexible como para permitir un movimiento lateral, de otro modo se ejercerán grandes fuerzas de contacto en la parte superior de la espiga y en las paredes del agujero. Sin embargo, cuando la varilla es demasiado flexible tiende a torcerse y clavarse.

El primer paso para resolver estos problemas implica la construcción de un dispositivo de articulación denominado centro remoto de adaptabilidad, que permite el giro de la espiga alrededor de su parte superior si está desalineada angularmente con el agujero. Un segundo enlace, montado en cascada con el primero, permite a la espiga moverse de un lado a otro para corregir un error lateral, sin introducir ningún giro no deseado.

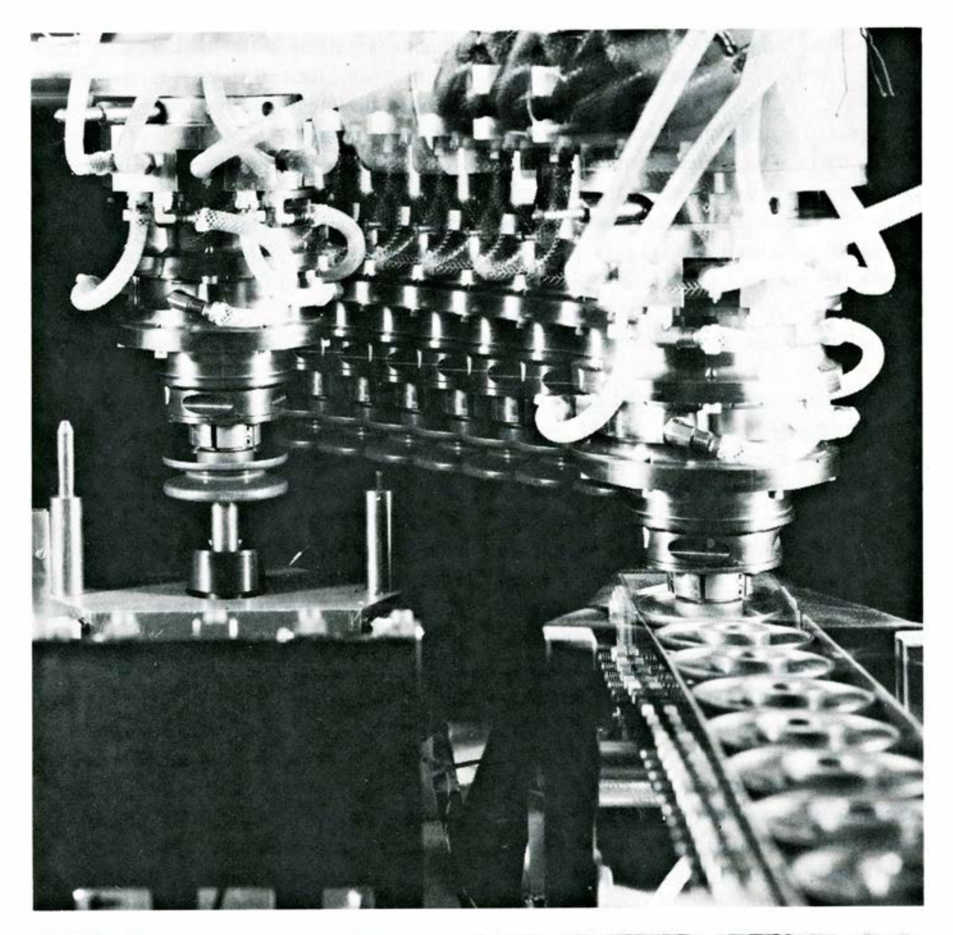
El análisis matemático del descentramiento puede mostrar que el descentramiento es menos probable, y las fuerzas de inserción más pequeñas, cuando se permite que la espiga gire alrededor de su punta superior. La combinación de propiedades deseables –movimiento lateral cuando se precisa y rotación alrededor de la cabeza– se han programado en un mecanismo adaptable perfeccionado que no está sujeto a aplastamiento por torcedura. El nuevo aparato, que es el primer mecanismo adaptable práctico, forma ahora parte de nuestra máquina de ensamblaje de laboratorio y está siendo estudiado por varias firmas industriales. Con él hemos llevado a cabo tareas de montaje que antes eran difíciles, verbigracia, colocar un rodamiento dentro de su alojamiento con una razón de tolerancia de 0,0004 en un quinto de segundo, empezando con un error lateral de un milímetro y un error angular de 1,5 grados. El nuevo aparato puede aplicarse perfectamente a equipos automáticos especiales y a sistemas de ensamblaje programables.

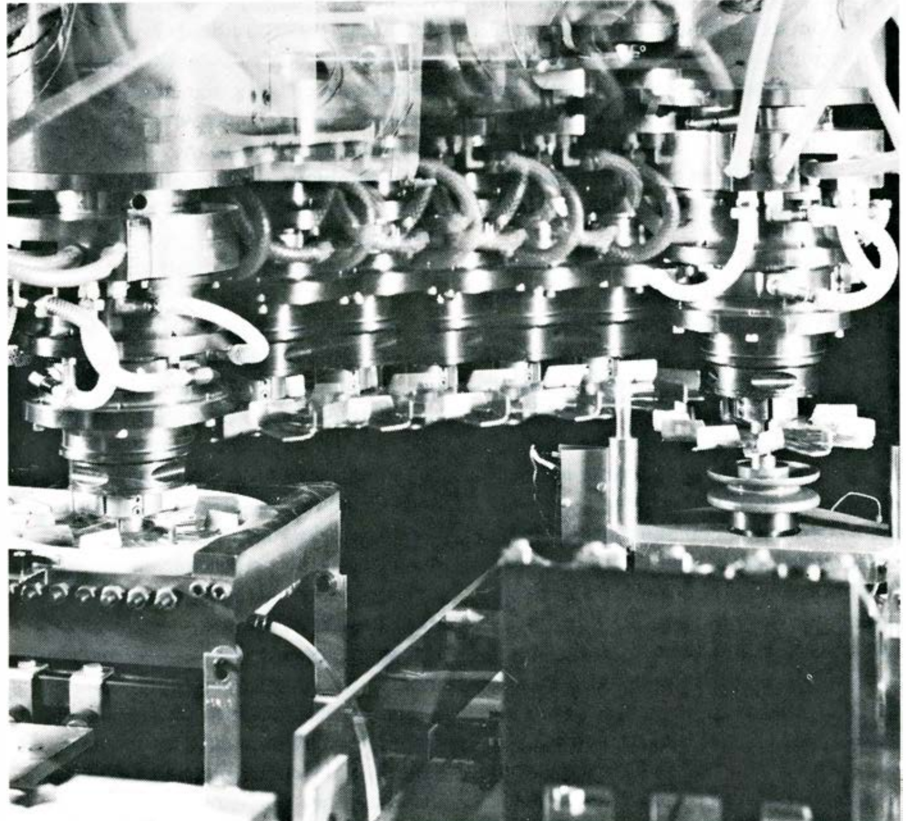
Otro aparato de movimiento fino que es el único que conocemos, y del cual sabemos que puede realizar inserciones con tolerancias estrechas, es el Hi-Ti-Hand desarrollado por Hitachi, Ltd., en el Japón. Se trata de una unidad activa motorizada que inserta espigas dentro de agujeros moviendo deliberadamente la parte superior de la espiga a ambos lados y captando con sensores de fuerza el momento en el que, como resultado del contacto de dos puntos, no se efectúa ningún movimiento lateral ulterior. De este modo, el aparato determina los límites de un embudo imaginario exterior al agujero definido por todas las posiciones limitadas por el contacto de dos puntos. Otra versión del Hi-Ti-Hand empuja la espiga hacia abajo, hasta que se realiza el contacto de dos puntos, y, a continuación, investiga una zona libre dentro del túnel. El sistema de control para detectar los contactos y cambiar la dirección del movimiento de la espiga está sujeto a las mismas restricciones que establecimos en nuestros estudios de la fuerza de realimentación. La mordaza que sostiene la cabeza de la espiga debe poseer resortes elásticos y las velocidades de tanteo deben mantenerse bajas para limitar las fuerzas del contacto. Los modelos normales del Hi-Ti-Hand son capaces de realizar sólo tareas de inserción vertical; además, precisan de varios segundos para lograr las clases de inserción que nuestro aparato adaptable de centro remoto realiza en un quinto de segundo.

Otro sistema comercial, desarrollado por Olivetti S.p.A., incorpora también sensores de fuerza para montar las piezas. El sistema Olivetti mide las fuerzas a lo largo de tres ejes, conforme las piezas van entrando en contacto mutuo, y transforma la medida en una secuencia de decisiones binarias (pieza presente o ausente, agujero presente o ausente), hasta que se realiza o se abandona el ajuste o apareamiento. El sistema posee dos brazos y se ha utilizado en la mecanización y el montaje de pequeñas partes.

Los mecanismos de ensamblaje elásticos pasivos, proyectados en nuestro laboratorio, representan la confluencia de tres líneas de aproximación: la estrategia de ensamblaje basada en la captación de vectores de fuerza, el análisis geométrico de tareas de ensamblaje y la teoría del recuñado y del descentramiento. Nos parece que estudios semejantes de tareas distintas de las inserciones conducirán al diseño de otros aparatos para ayudar al ensamblaje. Examinemos ahora las clases de problemas que hay que tener presentes a la hora de proyectar un sistema completo de ensamblaje.

Los sistemas de montaje son conjuntos de máquinas de ensamblaje capaces de acoplar conjuntamente uno o más productos. Para proyectar máquinas que puedan aplicarse ampliamente en la industria y para combinarlas en sistemas eficientes, es preciso conocer cómo son los productos industriales, qué tareas de montaje se presentan, en qué grado son pequeñas las tolerancias entre las piezas, cuántos modelos distintos se fabrican de un producto, y así sucesivamente. En el mismo orden, también es necesario comprender en qué forma se disponen eficientemente las líneas de ensamblaje, de suerte que, valga el ejemplo, una máquina no se retrase con relación a las demás. Por último, la selección de productos adecuados para el ensamblaje automático precisa de estudios económicos completos sobre el rendimiento y el coste que comporten los nuevos métodos en comparación con los actuales.





OPERACIONES TIPICAS DE ENSAMBLAJE. En la parte superior, el brazo del robot lleva a cabo la tercera etapa en la secuencia de ensamblaje representada en la ilustración de la página 34. Con la ayuda de la herramienta *1* (pequeña herramienta de tres dedos) el robot toma una polea de la línea de alimentación de la derecha y la deposita en el émbolo del herraje de ensamblaje principal. En la fotografía inferior, el robot, recurriendo al empleo de la misma herramienta, recoge un ventilador de la línea de alimentación de la izquierda y lo coloca en la parte superior de la polea.

La primera decisión en el proyecto es seleccionar el sistema que debe utilizarse, a saber: manual, máquina especial o una máquina de ensamblaje programable, o quizás alguna combinación de los tres sistemas. Este problema es esencialmente económico, siempre que puedan formularse proyectos técnicos factibles. Es práctica común en la industria realizar tales evaluaciones (hoy, entre los sistemas manuales y las máquinas especiales naturalmente) con un método de caja; pero nosotros decidimos inventar una fórmula matemática de los factores importantes. Tal fórmula permite poner nombre a las variables para establecer las relaciones entre ellas y explorar las condiciones, si existen, que favorezcan el empleo de máquinas de ensamblaje programables. En particular, necesitábamos encontrar si eran correctas nuestras hipótesis originales sobre la aplicabilidad de las máquinas de ensamblaje programables en fabricaciones de bajo volumen. Este esfuerzo, acometido con la colaboración de Paul Lynch, dio como resultado nuestro modelo económico de alternativas de ensamblaje.

Antes de llegar a formular el modelo, estábamos confusos por opiniones conflictivas y reglas aproximadas. Una opinión común, resultado de años de estudio de casos particulares, es que un proceso de ensamblaje automatizado sólo resulta más económico que el montaje manual cuando se montan, como mínimo, un millón de unidades cada año y a lo largo de varios años. ¿Cómo es posible, pues, que el "ensamblaje automático programable de bajo volumen de fabricación" sea económico?

Según otra opinión, los brazos de ensamblaje del robot deben poseer seis juntas de potencia, ya que un número menor de juntas impediría que el brazo efectuase todos los movimientos posibles de rotación y de traslación (hacia atrás y hacia delante), como si posicionara un objeto. Los brazos con menos de seis juntas estarán inevitablemente especializados; el fabricante deberá disponer necesariamente de varios modelos en cartera, si no quiere verse obligado a fabricar siempre unidades especiales caras en lugar de construir un brazo barato y que pueda "hacerlo todo". Pero, ¿por qué el cliente debe pagar juntas que no necesita, cuando todavía faltan muchos años para que se alcancen probablemente producciones masivas de brazos de robots? Sin disponer de un modelo económico, y sin un estudio cuantitativo de las tareas de ensamblaje, tales argumentos pueden con-

tinuar indefinidamente sin llegar a ninguna conclusión.

En primer lugar, consideremos el problema del modelo económico; ello nos ayudará a clarificar la cuestión de cuántas juntas debe tener un brazo. Nuestro boceto se ha simplificado necesariamente, pero las consideraciones principales no cambian mucho aunque aumente la complejidad. La industria juzga normalmente una inversión (la compra de una pieza del equipo) en función del dinero que puede ahorrarse y de la rapidez con que el ahorro amortiza la inversión. Una forma directa para evaluar la economía de un sistema de ensamblaje automático es comparar el coste de una unidad montada manualmente con el coste de montar la misma unidad de un modo automatizado. El coste principal en el montaje manual es el salario por hora. Este coste puede combinarse bien con la producción horaria, con el número de piezas de la unidad y con el tiempo que necesita una persona para añadir cada pieza a la unidad; a partir de lo cual puede determinarse el coste de montaje de la unidad completa.

Como las máquinas no perciben salario alguno, el enfoque a tomar será forzosamente distinto. Existen muchos tipos de enfoque, pero bastará uno sencillo para ilustrar el principio. La dirección de la compañía establece un período mínimo durante el cual la máquina debe amortizarse a sí misma, siendo los períodos más cortos los más deseables. A cada una de las unidades montadas durante el período seleccionado de amortización se le asigna una participación igual de la inversión inicial, creando así lo que equivale a "coste para montar una unidad". Este coste será tanto más elevado cuanto más se acorte el período de amortización. Si el coste es menor que el coste actual o proyectado del ensamblaje manual, resultará económico comprar la máquina. Ese es el planteamiento fundamental, si bien pueden intervenir otros factores: impuestos, intereses, costes de mantenimiento, valores de aprovechamiento, y así sucesivamente. De aquí se deduce que, si un modelo económico debe predecir cuándo un determinado tipo de maquinaria será o no económico, el modelo debe ser capaz de predecir la cifra de la inversión inicial. Requerimiento que, a su vez, exige tipificar la cantidad de trabajo a realizar para ensamblar cada unidad.

Hemos medido el trabajo necesario para tres amplias alternativas –montaje manual, máquina especial de montaje y robot programable de montaje– contando simplemente cuántas piezas constituyen una unidad. La inversión para una maquinaria especial se supone que es proporcional a la pieza considerada, ya que cada pieza precisa de una estación de trabajo distinta. Una estación para piezas pequeñas puede costar unos 6000 dólares americanos; para piezas grandes el coste puede llegar a 200.000 dólares. El coste puede disociarse, a grandes rasgos, en tres categorías: piezas de máquina y materiales, 25 a 35 por ciento; proyecto y construcción, 30 a 50 por ciento; y la puesta a punto de la máquina, una vez instalada, 15 a 45 por ciento. El número de estaciones para realizar un trabajo dado no depende del volumen de producción requerido, a menos que el volumen sea tan grande que se precisen varias máquinas. De aquí que se obtengan economías de escala si el volumen de producción es grande; ahora bien, el "coste de ensamblaje de una unidad" resulta elevado si el volumen de fabricación es pequeño.

En oposición a lo anterior, la inversión para una máquina programable se prevé que dependa significativamente del volumen de producción requerido, porque una estación puede ejecutar varias tareas de ensamblaje en una unidad. Por consiguiente, pueden lograrse volúmenes de baja producción con una baja inversión, utilizando unas pocas estaciones, cada una de las cuales fabrica muchas piezas en una unidad. Los grandes volúmenes de fabricación pueden satisfacerse por medio de muchas estaciones que entreguen, cada una, unas pocas partes. Hay que señalar que se precisan mordazas y dosificadores para manejar cada pieza; de modo que una fracción de los costes no depende del volumen de fabricación. La relación entre el coste de una estación automática, el tiempo medio requerido para fijar una pieza a una unidad y el coste de las herramientas y herrajes puede establecerse mediante ecuaciones sencillas que permiten predecir la inversión requerida y, por tanto, el coste de la unidad de ensamblaje para un período de amortización dado.

Los modelos de los tres métodos de ensamblaje relacionan la mayor parte de las cantidades reconocidas: el tipo de trabajo que se realiza, el coste de las variadas técnicas y de su velocidad, el coste de la mano de obra y la producción anual requerida. Cuando se introducen estimaciones numéricas razonables de estos factores en nuestras ecuaciones, obtenemos curvas de la clase mostrada en la ilustración de la página 40. Si bien las curvas representan una teoría no verificada en absoluto, parecen razonables en varios aspectos. En primer lugar, reproducen la conclusión de que las máquinas especiales son económicas comparadas con el ensamblaje manual, cuando el número de unidades fabricadas excede de un millón por año. En segundo lugar, las curvas muestran los beneficios económicos de la programabilidad: la curva para máquinas programables cae por debajo de la de máquinas especiales, porque se precisa un número menor de estaciones de trabajo para bajos volúmenes de producción. Esto crea una gama de volúmenes de producción inferior a la producción en masa, campo en el que las máquinas programables presentan un seguro de economía. Al ser las máquinas reprogramables, cabe aplicarlas al ensamblaje de productos fabricados en familias de modelos. El volumen de producción de cada modelo puede ser pequeño, pero el conjunto será lo suficientemente grande como para justificar el ensamblaje programable.

La ecuación para los costes del conjunto programable resuelve también un viejo dilema: economizar fabricando brazos de ensamblaje rápidos o ahorrar con brazos de ensamblaje baratos. Las ecuaciones muestran que sólo es importante el coste del brazo multiplicado por el tiempo necesario para añadir una pieza. Se llega al mismo efecto con un cambio de igual porcentaje en cualquier factor. Un estudio adicional del proyecto del brazo específico ha mostrado también que la forma más efectiva para reducir el producto de los dos factores es fabricar un brazo pequeño y ligero que tenga el menor número de juntas posible.

Estos razonamientos nos llevan de nuevo a la pregunta, no respondida, de cuántas juntas debe tener un brazo, pregunta que es elemento de la cuestión, más importante, de acoplar el brazo al trabajo. Para obtener una información básica en las tareas de ensamblaje, nuestro colega Anthony S. Kondoleon separó y montó de nuevo varios productos típicos, tales como un freno de bicicleta, un compresor de refrigerador, una sierra eléctrica, un pequeño motor eléctrico y un tostador eléctrico. Surge una pregunta clave respecto a lo que pudiera llamarse la coreografía del asunto: ¿En qué secuencia se fijan las piezas al producto y desde qué direcciones llegan? La dirección de llegada viene determinada por la situación de las piezas en el producto, cómo se acoplan dentro del agujero, sobre un pasador o en una ranura, y qué otras piezas bloquean su paso.

Kondoleon encontró que, en uno de los ejemplos que inspeccionó, alrededor del 60 por ciento de las piezas llegaban desde una dirección, 20 por ciento más llegaban desde otra segunda dirección opuesta a la primera, 10 por ciento provenían de un plano perpendicular a los dos primeros planos y el restante 10 por ciento procedían de otras varias direcciones. Esto significa que los productos son esencialmente bancadas; es decir, están fabricados con materiales mecanizados o moldeados y constan de un cuerpo principal o armazón al cual se añaden las piezas. La única excepción al número pequeño reconocido de muestras que estudió Kondoleon fue el tostador, hecho de lámina metálica, plástico y alambres. En este caso no predomina ninguna dirección de llegada, y los alambres de bloqueo y las piezas de hoja metálica hacen que el producto sea difícil de montar.

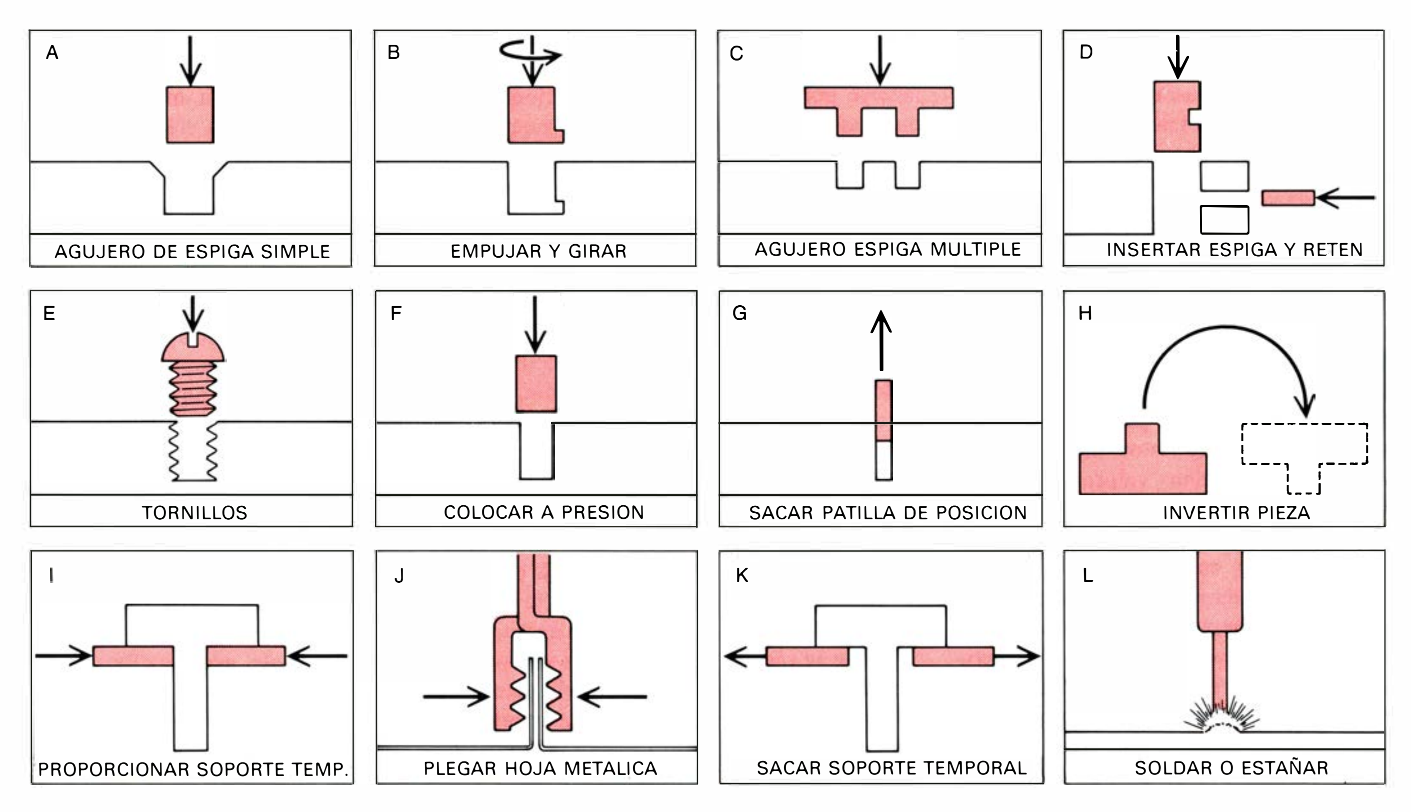
Kondoleon catalogó también las diferentes clases de tareas de ensamblaje requeridas para cada producto, su frecuencia relativa y las direcciones de acercamiento de las piezas asociadas con aquellas tareas. Las tareas simples de inserción espiga-agujero no sólo fueron las más frecuentes en todos los casos, sino también las más frecuentes a lo largo de la dirección dominante de acercamiento. La segunda de las tareas más frecuentes fue la instalación de tornillos, pero como detalle interesante la mayor parte de éstos se hallaban insertados en direcciones perpendiculares a la dominante. Se identificaron otras muchas tareas, pero ninguna de ellas fue dominante en alguna dirección particular.

Como las direcciones dominantes forman un sistema de coordenadas en ángulo recto *x y z*, puede concluirse que un brazo, con las juntas justamente suficientes para moverse a lo largo de tres direcciones perpendiculares, puede llevar a cabo todos los movimientos bastos requeridos en el movimiento de las piezas conjuntamente para producciones típicas de "bancada". Como es natural, se necesitarán grados adicionales de libertad, para cumplir toda la tarea de ensamblaje, si bien pueden limitarse a movimientos finos. Cuando este descubrimiento general se combina con los compromisos en el coste del brazo y en la velocidad, indicados por el análisis económico, nuestras conclusiones son: que los productos tipo bancada ofrecen un área prometedora para aplicar los montajes programables y que los brazos cuyos movimientos bastos siguen unas coordenadas rectangulares o cilíndricas serán muy adecuados para realizar la tarea.

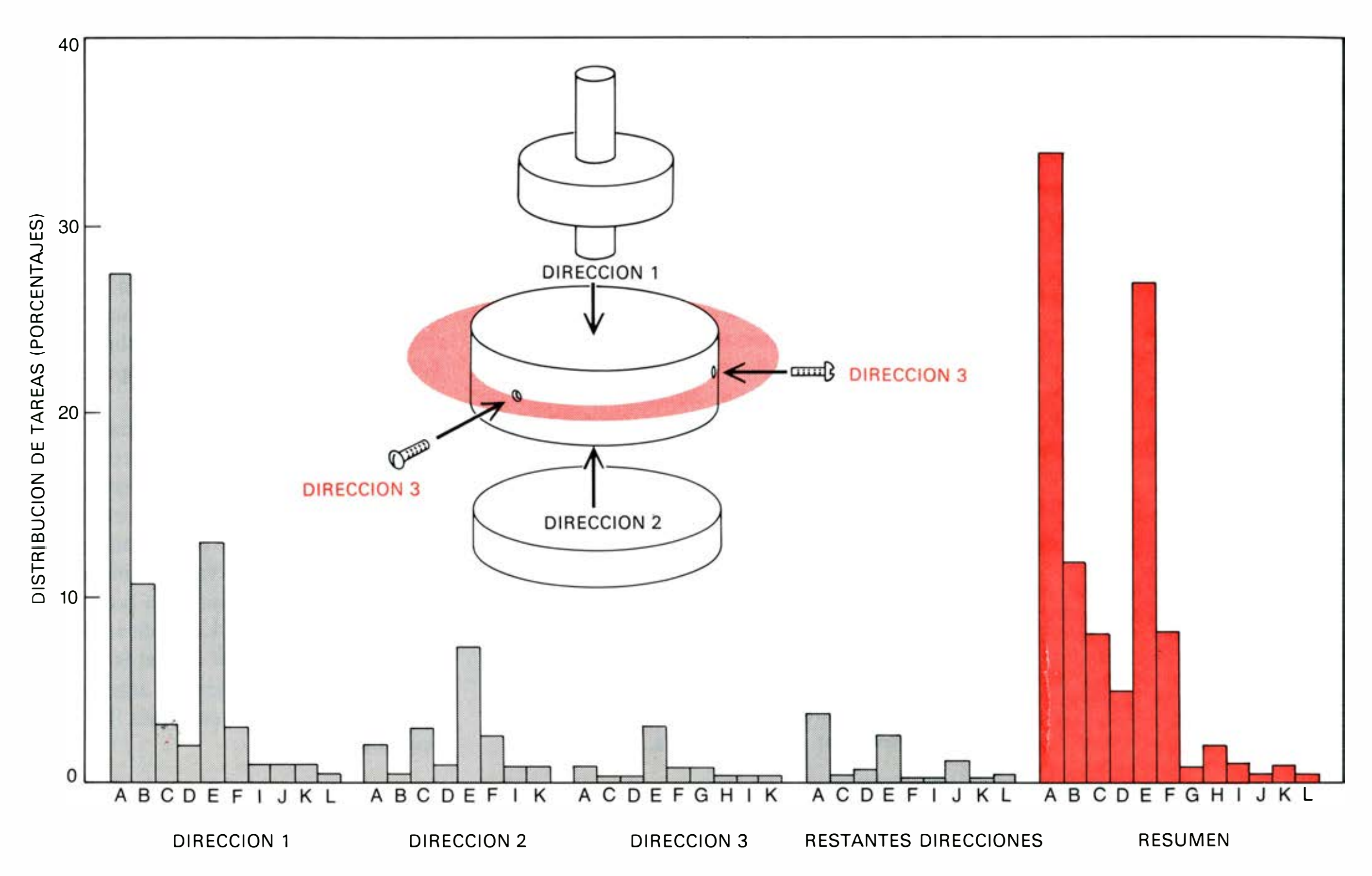
Como parte de nuestro programa, hemos fabricado y operado recientemente en nuestro laboratorio un sistema de ensamblaje programable adaptable. Consiste en un robot de ensamblaje industrial controlado por ordenador con cuatro grados de libertad. La articulación del robot contiene una versión avanzada de nuestro aparato de inserción de adaptabilidad pasiva. El sistema se ha preparado para montar un alternador de automóvil Ford, empleando seis herramientas intercambiables. El alternador posee 17 piezas, todas las cuales pueden insertarse desde una dirección con la ayuda de dos herrajes de ensamblaje.

El sistema se construyó al objeto de obtener datos de un ensamblaje programable adaptable y ensayar nuestros diseños de acoplamiento de piezas en un producto industrial real. El alternador es un buen objeto experimental por tratarse de un producto tipo bancada; su montaje requiere varias tolerancias estrechas espiga-agujero y operaciones de roscado de tornillos. No se ideó el experimento para mostrar si los robots debían montar los alternadores. Ford Motor Company fabrica cada año casi dos millones de alternadores, lo que pone de manifiesto que una máquina especial podría ser una elección mejor.

El experimento mostró que la articulación de adaptabilidad era un aparato ex-



TAREAS TIPICAS DE FABRICACION. Se identificaron extrayendo aparte, y montando de nuevo, varios productos y sus componentes: un compresor de refrigeración, una sierra eléctrica, un motor eléctrico de inducción, un tostador eléctrico, un freno de bicicleta y el alternador de automóvil empleado en el proyecto de ensamblaje de robots. Todos los ejemplos podían ensamblarse combinando estas 12 operaciones.



LA DIRECCION DE ENGANCHE de las piezas se analizó en el estudio que clasificó los tipos de operación requeridos. El diagrama central define las tres direcciones principales de enganche. La dirección *1* es dominante, seguida por la dirección *2* y por la dirección *3*. La dirección *3* es cualquier dirección perpendicular a las otras dos. El gráfico de barras relaciona la dirección del enganche con el tipo de tarea implicada, de acuerdo con la anterior identificación. Las tareas espiga-agujero *(A)* superan en número a las restantes, seguidas por la inserción de tornillos *(E)*.

tremadamente útil. Las rugosidades de las superficies exteriores de las piezas hacen difícil soportarlas en sus guías de alimentación o en los herrajes de ensamblaje, en posiciones y orientaciones conocidas y repetidas. Son inevitables y típicos los errores de posición de un milímetro. El aparato de adaptabilidad elimina tales errores recogiendo piezas de varios tamaños, colocándolas en herrajes e insertando con éxito piezas de tolerancia estrecha para montar un alternador completo. La flexibilidad del aparato de articulación reduce también grandemente el tiempo requerido para ajustar los dosificadores y los herrajes.

La operación completa de ensamblaje dura dos minutos y 42 segundos. Una ingeniería más perfecta de las herramientas y de los herrajes, juntamente con una leve modificación en el diseño, podría reducir el tiempo a un minuto y cinco segundos, aproximadamente. El ahorro de mayor cuantía consistiría en reducir el tiempo necesario para el cambio de herramientas, que actualmente ocupa el 30 por ciento del total. Una forma de lograrlo sería montar varios alternadores a la vez, de modo que el robot llevaría a cabo la misma operación sobre varias unidades antes de cambiar a la herramienta siguiente.

Un estudio detallado de la forma en que el robot emplea su tiempo revela también las relaciones entre movimientos bastos, movimientos finos y una tercera categoría: movimientos de interfase. Entre los movimientos bastos y los finos existe una región de interfase donde el robot se alinea por sí mismo para un movimiento de inserción, antes de que las piezas hayan empezado a entrar en contacto. En esta zona próxima a las piezas, las trayectorias deben efectuarse con cuidado. Encontramos que los movimientos bastos toman sólo el 33 por ciento del tiempo total y que los movimientos finos emplean menos del 20 por ciento. El resto del tiempo es utilizado por los movimientos de interfase. Este hecho sugiere que puede buscarse el aumento de la velocidad de ensamblaje mejorando los movimientos de interfase (quizá con un aparato de movimiento de interfase independiente), en vez de intentar aumentar la velocidad de los movimientos bastos, tal como lo realizan corrientemente los fabricantes de muchos robots.

El experimento ha demostrado la posibilidad de montar un producto tipo bancada con un robot capaz de movimiento sólo a lo largo de cuatro ejes. Es importante señalar que el alternador puede representar un caso especial. Muchos productos tipo bancada tienen algunas piezas que llegan desde direcciones excéntricas, lo que significa que un sencillo robot de cuatro ejes no puede montar el producto completo.

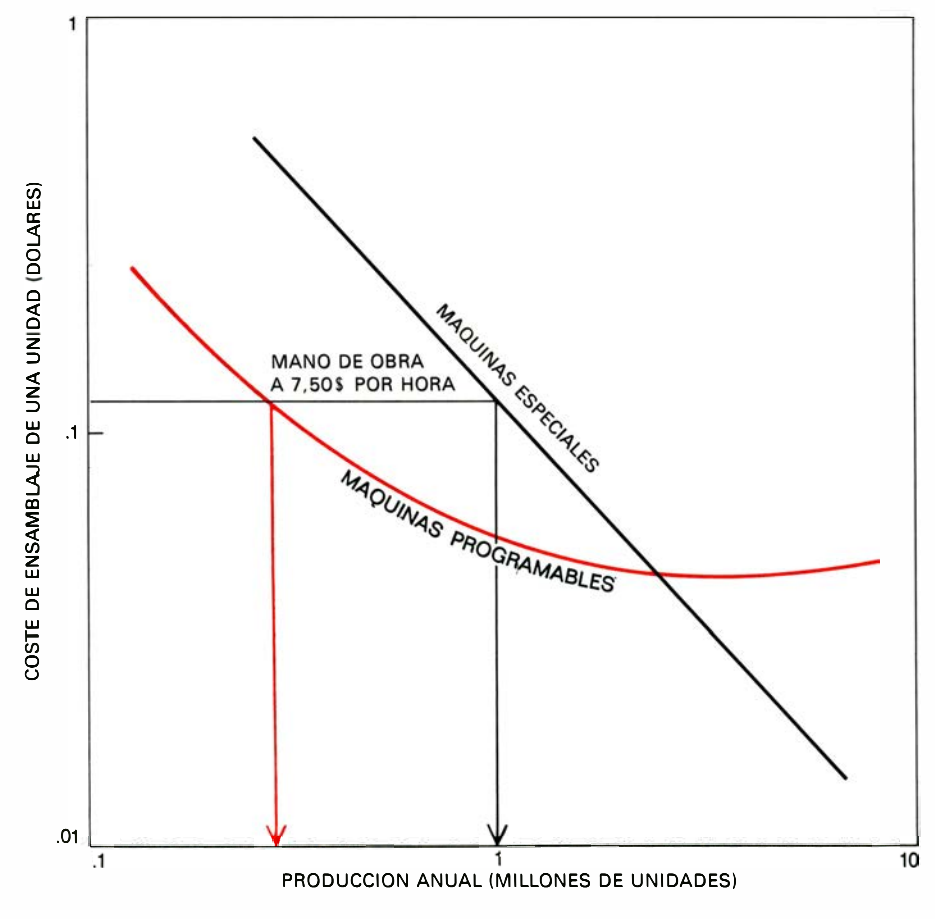
En cualquier caso, nuestro análisis económico muestra que un sistema de ensamblaje de un brazo sería satisfactorio sólo para los productos de bajo volumen anual (inferior tal vez a las 50.000 unidades), suponiendo que el brazo del robot, análogamente al del hombre, necesite de tres a cinco segundos para añadir cada pieza. Ante valores de fabricación más altos, se necesitarían varios brazos. Cada brazo puede ponerse a trabajar con conjuntos completos de dosificadores de piezas y de herramientas para ensamblar productos terminados. Sin embargo, los costes de las herramientas y de los dosificadores serían más bajos si los brazos estuvieran agrupados en una línea de montaje y cada uno añadiera

unas pocas piezas del conjunto. Entonces, sólo se necesitaría un conjunto completo de herramientas y herrajes, y los brazos podrían ser más sencillos.

En la mayoría de los productos, el proyectista de los sistemas de ensamblaje goza de cierta libertad para escoger la secuencia según la cual las piezas se han de añadir al producto. Puede sacar provecho de esta libertad agrupando tareas con direcciones semejantes y requerimientos de herramientas en una estación en la línea de producción y asignando un brazo con el número adecuado de ejes para llevar a cabo las tareas. El equilibrado de la línea (dando a cada brazo la misma cantidad de trabajo aproximadamente) forma también parte del propósito del proyectista, y hay que señalar que no es fácil alcanzar todos estos objetivos. El proyectista puede descubrir, durante su trabajo, que unas leves modificaciones en el propio producto harán más fácil y más rápido, o menos caro, el ensamblaje. Queda mucho todavía por recorrer en esta parcela.

Se ha efectuado, pues, una iniciación en la compresión del ensamblaje desde un punto de vista científico. Esperamos que este trabajo, conjuntamente con otros estudios subvencionados por la National Science Foundation, encontrarán una aplicación beneficiosa en la industria de América y de Europa. Debe también señalarse que la aplicación de nuestras investigaciones no está limitada al ensamblaje industrial. Se realizan muchos trabajos en ambientes peligrosos o difíciles con la ayuda de manipuladores mecánicos.

Entre los ejemplos que pueden aducirse están los experimentos acometidos con productos químicos radiactivos, insertando barras radiactivas en reactores nucleares, limpiando o inspeccionando tubos en calderas de vapor e inspeccionando el fondo del mar para buscar minerales o petróleo. La aplicación del conocimiento y de los aparatos que hemos venido describiendo aquí puede hacer que estas tareas sean más fáciles de desarrollar.



EL MODELO TECNOLOGICO-ECONOMICO conduce a curvas de costos tales como la representada. Mientras las máquinas programables de usos generales no sean una opción, el fabricante debe escoger entre las máquinas especiales y las de ensamblaje manual. Si la mano de obra cuesta 7,50 dólares por hora, el modelo estima que el punto de decisión para la máquina especial se cifra en un volumen de producción de un millón de unidades al año aproximadamente, suponiendo un período de dos años para amortizar la inversión. Cuando los robots programables estén suficientemente desarrollados, deberán ser atractivos desde el punto de vista económico para volúmenes bajos del orden de 300.000 unidades por año de un producto o de un grupo de productos; serán más baratos que las máquinas especiales hasta un límite de fabricación de tres millones de unidades.

Ciencia y sociedad

Nobel de Economía 1977

El profesor británico James E. Meade, nacido en 1907, ha desarrollado a lo largo de su ya dilatada vida una intensa actividad como docente, autor y asesor oficial. Todo su trabajo se halla atravesado por la unión de su gran rigor académico y de una fina ironía que aporta el contrapunto de la referencia a la realidad, incluso en los textos más abstractos y teóricos. En 1928 terminó su primera formación de carácter literario y centrado en los clásicos, en Oxford. Allí mismo se gradúa en filosofía, política y economía en 1930 y luego estudia en el Trinity College de Cambridge (hasta 1931).

El profesor Meade no desarrolla su pensamiento económico exclusivamente enraizado en la tradición neoclásica, con una exclusiva vocación de coherencia intelectual y de elegancia formal, sino movido además por la pretensión de que la ciencia incida sobre la realidad, tenga que ver con ella y se vea fomentada por esta relación. Simultáneamente a su actividad teórica, el profesor Meade ha venido desplegando siempre una notable actividad en el campo de la política económica, bien como autor de textos aplicados al análisis de cuestiones concretas, bien como perito asesor en organismos internacionales o bien como consejero en su propio país.

El profesor Meade expresa su visión del papel de la ciencia económica y del economista en concreto, mediante la recuperación del término clásico de economía política. Con ello se opone, pues, a quienes con la expresión de teoría económica o con el de econometría han querido definir un tipo de análisis cerrado en sus propias leyes, más próximo al ejercicio de estilo que a la eficacia que uno debe exigirle en un último extremo al científico social.

Ahora bien, puestos a referirnos a rigor social y elegancia, la *Geometría del Comercio Internacional* (1951) de Meade constituye un modelo de tales virtudes. Como constituye un modelo de elegancia y de rigor su *The Stationary Economy* (1965). Tanto al principio como al final del libro, Meade advierte de las limitaciones de un análisis que se mueve en el entorno de los procesos lógicos contenidos en las selecciones entre variables propias de los sistemas, tales como los de la vida económica real, cuando ese análisis no permite introducir, junto con las relaciones lógicas, los datos reales de los problemas económicos reales. Así, si el libro constituye un alegato lógico en favor de la economía de mercado, Meade no duda en reconocer que con ese alegato lógico no es suficiente para dirimir entre el laissez faire y el socialismo. En su segundo volumen sobre los Principios de la Economía Política, *'The Growing Economy'* (1968), Meade tampoco comete el error de defender posiciones cerradas, sino que parte de determinados supuestos y los va desarrollando; supuestos que eran más realistas que los del primer volumen, pero todavía alejados del funcionamiento real.

Su pretensión es que los modelos sirvan como experiencia previa al enfoque racional de los problemas frente a los cuales, en última instancia, el científico social deberá definirse, aconsejando en este o en aquel sentido. La diferencia con respecto al primer volumen no es solamente el paso de la estática a la dinámica, con la correspondiente introducción del tiempo, los bienes de capital y el ahorro, y la consideración más realista del dinero, sino también el análisis de distintas situaciones, entre ellas las de un capitalismo igualitario, un capitalismo desigual, una economía de bienestar y un socialismo planificado, todos ellos modelos abstractos que contrapone entre sí.

Con ello se orilla el contraponer el funcionamiento ideal de un sistema con el comportamiento real de otro, método nada honesto, pero no por ello poco habitual entre ciertos autores.

El tercer volumen de su Economía Política está precisamente dedicado a la *Economía Controlada,* en el que en realidad reúne sus reflexiones, en gran parte fruto de la experiencia británica. Con ello enlaza con uno de sus textos de la inmediata postguerra *Planning and the Price Mechanism* (1948), librito que pretendía incidir en la polémica real suscitada por las nacionalizaciones laboristas del acero y del carbón y por el impacto del modelo soviético en el contexto centroeuropeo.

Las aportaciones teóricas más notables del profesor Meade se sitúan en el campo del comercio internacional, motivo concreto por el que se le otorgó junto con el también especialista en el mismo tema, el sueco Bertil Ohlin, el premio Nobel de Economía de 1977. Es conocida además de su *Geometría* ya citada, su previa *Theory of International Economic Policy,* en cuyo primer volumen, *The Balance of Payments* (1951), desarrolla su teoría de los multiplicadores del comercio internacional, y cuyo segundo volumen, *Trade and Welfare-Mathematical Supplement,* constituye, por un lado, el precedente en forma de libro de su Geometría y, por otro, un texto teórico e inicial con respecto a un tema que será después más ampliamente tratado por Meade: la teoría del bienestar y sus relaciones con la teoría de la población. El profesor Meade ha sido miembro del Consejo de la Sociedad Eugénica de Londres de 1962 a 1968.

Esta obstinada voluntad de que la ciencia no constituya un puro juego intelectual, sino que posea un contenido útil, entronca con la tradición de la escuela clásica y se encuentra ya en uno de sus primeros libros: *An Introduction to Economic Analysis and Policy* (1938), escrito bajo la influencia de su formación en Oxford, y publicado cuando ya había asumido funciones en la Sociedad de Naciones, institución para la que preparó el *World Economic Survey,* de 1937 a 1940. Ya entonces (1938), somete su texto a la consideración de un joven profesor de Harvard, John Kenneth Galbraith, con quien le unirán bastantes rasgos en la preocupación intelectual y en la actitud civil.

Meade participa en la guerra desde un puesto en la sección económica del Secretariado del Gabinete –como miembro (1940-1946)–, y después es nombrado director de la sección (1946 a 1947). Cuando publica su *Planning and the Price Mechanism* (1948), mantiene una actitud favorable a la intervención estatal para preservar el funcionamiento del sistema de mercado, que le enfrenta con posiciones como las de Hayek, tan influyentes en la polémica del momento. Todo ello no obsta para que Meade haya partido siempre desde su *Efficiency,*

Equality and the Ownership of Property de posiciones claramente liberales. Ultimamente, cuando publica su *The Intelligent Radical's Guide to Economic Policy* (1975), sostiene, con casi treinta años de diferencia, tesis relativamente parecidas, pero en el contexto actual, aunque, y esto creo que constituye un mérito paralelo al de la apertura de Galbraith a los norteamericanos radicales, con argumentaciones y consideraciones más valientes, en términos convencionales, más de izquierdas, que las que cabría deducir de sus posiciones durante la guerra o estrictamente por su distinguida formación oxoniense.

En este ameno texto sobre lo que debería sostener un radical si estuviese empapado de teoría económica, James Edward Meade plantea siete u ocho condiciones para mantener una actitud coherentemente radical: 1) el reconocimiento de la función del dinero y de los precios; 2) la política de raíz keynesiana es ineficaz sino comporta decisiones antimonopolio con respecto a las grandes empresas y a los sindicatos; 3) cuando las economías de escala imponen el monopolio técnico, éste ha de suponer el control y propiedad públicos; 4) la oferta de bienes públicos indivisibles por parte del estado o la administración local ha de suponer una actividad no despreciable ni marginal; 5) una intensa fiscalidad directa es fundamental, puesto que el radical es igualitarista y quiere mantener el mercado; 6) el mecanismo de mercado es insuficiente para afrontar la incertidumbre del futuro y se requiere alguna forma de planificación estatal; 7) los cambios estructurales fundamentales deben programarse a través de planificación central; 8) los costes sociales fuerzan a controles o intervenciones en casos del tipo medio ambiente, recursos agotables y la población. Todo ello exige utilizar argumentos razonables para persuadir a ciudadanos razonables de la necesidad de adoptar medidas de política económica razonables.

Tesis parecidas a las de este libro las expuso ya en su *The Control of Inflation.* No hay que olvidar su vinculación con Keynes, lógica por parte de todos los economistas ingleses de la época que tuvieron que sostener con él discusiones importantes en el contexto de la dirección económica de la guerra. Cabe citar aquí la participación de Meade en lo que en parte constituyó, sino la biblia, sí al menos uno de los evangelios fundamentales del keynesianismo, *La Nueva Ciencia Económica* (1948), editada por Seymour Harris.

Este período enlaza con sus numerosos artículos donde relaciona a menudo el sistema monetario y el comercio exterior. Cabe recordar aquí "La cantidad de dinero y el sistema bancario", anterior a 1950 y reproducido en los conocidos *Readings in Monetary Theory* de la American Economic Association; "El mecanismo Monetario internacional", reproducido en los *Readings in Macroeconomics* (1966), editados por M. G. Mueller, o su más reciente "El Futuro de los pagos internacionales", en *La Reforma Monetaria Internacional* (1970), editada por Grubel.

El profesor James Edward Meade atribuyó, desde el principio, una gran importancia a los fenómenos de la Unión Aduanera y Económica. Fue uno de los primeros en estudiar el Benelux, estudio preparado para la Universidad de Princeton en 1956, reproducido en *Case Studies in European Economic Union* (1962). Pionero también en abordar, a partir de las discusiones iniciales de la guerra fría y de la creación de la OTAN, los problemas de la Europa Occidental, intentando situarlos menos en una estrategia del rearme y la agresión y más en término de economía de bienestar: *Problemas de una Unión Económica* (1952). Al mismo estilo pertenece *The Theory of Customs Unions* (1956), que corresponde también a su larga etapa de profesor de la London School of Economics (1947 a 1957), con toda certeza la más profundamente dedicada al estudio del comercio internacional.

Con un breve viaje económico a Australia (1956) su vida se orientará otra vez hacia Cambridge, donde reside hoy y donde será profesor de Economía Política hasta 1968, continuando después su vinculación con Cambridge hasta 1974 a través del Christ College. El profesor Meade tiene grados honoris causa por las Universidades de Basilea, Bath, Essex, Hull y Oxford, y es miembro honorario de la London School, de dos colegios universitarios, de Oxford y del ya citado de Cambridge. (A. M.)

Dinámica de poblaciones de peces

En el pasado mes de octubre se celebró, en el Instituto de Investigaciones Pesqueras de Barcelona (España), una mesa redonda sobre la dinámica de las poblaciones de peces, examinándose las experiencias pasadas y presentes y las posibilidades futuras. Las directrices de esta mesa redonda se enmarcaron dentro de los siguientes temas: estado actual de la dinámica de las poblaciones; dinámica de las poblaciones en relación con el medio ambiente; dinámica de las poblaciones y el comportamiento de los peces; dinámica de las poblaciones en relación con el control de las pesquerías, y, finalmente, examen crítico del estudio dinámico de las poblaciones desde el punto de vista ecológico. La organización de la mesa redonda corrió a cargo del autor de esta nota, doctor Carlos Bas, profesor de Investigación y Coordinador del grupo de Pesquerías en el mencionado Instituto.

El espíritu que animó a esta reunión mundial, en que se dieron cita unos 70 investigadores de todo el mundo de los principales institutos de investigación y explotación industrial, queda centrado en su espíritu crítico, es decir, tendente a someter a examen las posiciones teóricas esgrimidas hasta el momento presente contrastándolas con la realidad práctica del control de las pesquerías, por una parte, y, por otra, con las líneas modernas que tienden a entroncar la dinámica de las poblaciones pesqueras con las costumbres de los peces y otros animales marinos explotables. El aspecto destacado, por encima de los muchos analizados, fue la tendencia a considerar el dinamismo de los grupos de peces como integrados en un conjunto comunitario constituido por muchísimas especies, unas explotadas y otras sin importancia económica, aunque estrechamente relacionadas con las anteriores.

La noción de la estructura dinámica de poblaciones multiespecíficas tiene extraordinario interés, en particular, en el caso de explotaciones internacionales; en muchas de ellas importa una sola especie, aunque la acción pesquera produce no sólo el deterioro de las poblaciones de interés sino el de otras que, ecológicamente, pueden estar muy correlacionadas. Hasta el presente únicamente se preveía el estudio y control de la especie interesante, pero se tiende ya a centrar la atención en el hecho de que es preciso conocer el dinamismo de cada uno de los componentes de la comunidad y al mismo tiempo, la incidencia que sobre ellos y sobre sus mutuas relaciones tiene la pesca. La acción dirigida sobre una sola especie resulta perjudicial; si la misma se ejerce sobre una comunidad en la que pueden existir depredadores y presas, puede suceder que las medidas de control desarrolladas para cortar la disminución progresiva de la especie principal no obtenga los resultados apetecidos, y, ello por el sim-

ple hecho de que la población constituida por la presa (que constituye el alimento de la especie explotada) pueda ser quizá más vulnerable a las artes de pesca. En este caso, el control de cada una de las diferentes poblaciones que se encuentran en una misma área deben contemplarse desde el punto de vista de su reacción particular ante el arte de pesca, de su reacción en conjunto y de las variaciones que la acción pesquera produce en las reacciones mutuas y, en especial, en las de tipo alimentario. Desde el punto de vista práctico, ello obliga a un conocimiento más amplio de las características biológicas de cada una de las especies y de la ecología del conjunto.

Se presentaron modelos tendentes a comprender el efecto sobre estas poblaciones multiespecíficas y se sometieron a debate crítico los mismos. Se adujo el ejemplo concreto del control de la pesquería de arrastre instalada en la plataforma costera de la provincia de Castellón (Mediterráneo español). Se trata de una pesquería constituida por varias especies, entre las que destacan tres principales: el salmonete *(Mullus barbatus)*, la móllera *(Gadus capellanus)* y la merluza o pescadilla *(Merluccius merluccius)*. Cada una de estas especies responde diferentemente ante un tipo de acción pesquera común: la pesca de arrastre en aguas poco profundas. Esta zona mostraba biológicamente signos claros de agotamiento y fue preciso un programa de estudio-control basado en algunos principios derivados de la teoría de la dinámica de las poblaciones, para conseguir cierta recuperación de la biomasa (o cantidad de pesca) explotable.

En las condiciones en que se realizó el experimento se consiguió un éxito notable, aunque favoreciendo de forma prioritaria las poblaciones de salmonete, en detrimento de las de merluza, toda vez que el tipo de malla reglamentado estaba de acuerdo con la primera de estas especies.

Se investigó asimismo el comportamiento de las poblaciones de peces frente a los demás miembros de la comunidad, frente al ambiente en que viven y, finalmente, aunque este aspecto se vio de soslayo, frente a la acción de las artes de pesca. En el segundo de esos tres aspectos se hizo especial mención de la importancia de considerar los factores externos a los propiamente biológicos, temperatura del medio, cambios de masas de agua, etcétera, como altamente influyentes en la determinación de desplazamientos y procesos de agregación de peces, lo cual repercute en la disponibilidad de los recursos. Se ha comprobado que estas circunstancias influyen poderosamente; por ello, en muchas ocasiones, las estimaciones obtenidas sobre la acción de la pesca y la aparente respuesta en la tasa de abundancia no responden a la realidad, lo cual explica ciertas anomalías de difícil comprensión, y que, en no pocos casos, dan un falso esquema del estado real de una pesquería.

El comportamiento intraespecífico es especialmente importante a nivel de competencia por el alimento. La presencia de acúmulos del alimento actúa de condicionante frente al desplazamiento de los peces y también como núcleo de concentración. Esta clase de estudios son objeto de investigaciones independientes, y la mesa redonda en cuestión sirvió para potenciar la importancia de integrarlos en el estudio de la dinámica de las poblaciones, a fin de conseguir una mejora del nivel de control y predicción cara a una programación adecuada de las campañas pesqueras. Hay que insistir una vez más en la importancia de estas investigaciones en el control de los recursos naturales del mar en todo momento y, más concretamente hoy, en que los países con recursos naturales frente a sus costas se muestran extremadamente celosos de los mismos.

En este sentido resulta de vivo interés la conferencia sobre la "Ley del Mar", que busca hallar un justo uso de los recursos disponibles, precisa de un conocimiento lo más exacto posible del comportamiento de los peces y otros recursos, de sus características biológicas y de sus interrelaciones mutuas; en ellas pueden y deben encontrarse las bases reales para el establecimiento de un ordenamiento jurídico de la explotación de los recursos marinos. La extensión de las aguas jurisdiccionales y control pesquero hasta 200 millas llevado a cabo por muchos países no siempre tiene una justificación real, especialmente atendiendo a las características de la plataforma costera y a los recursos biológicos allí existentes. (C.B.)

Nacimiento traumático

En la astronomía moderna, el cielo está lleno de fuegos de artificio: las supernovas fulguran y se atenúan, las estrellas neutrónicas ruedan como girándulas, los sistemas de estrellas binarias eruptan rayos X y quizá rayos gamma. Ahora tenemos pruebas de un suceso explosivo más cercano a nosotros. Parece ser que la formación del sistema solar podría haber sido desencadenado por la conclusión de una supernova.

Las pruebas se deducen de unos gránulos hallados en meteoritos, gránulos compuestos de elementos de composición isotópica diferente a la del resto de la materia del sistema solar. Los gránulos pueden interpretarse como desechos de la explosión de una supernova, que no podría haber ocurrido mucho antes de formarse los meteoritos. Las anomalías isotópicas han sido detectadas por dos grupos principales de investigadores, uno dirigido por Robert N. Clayton, de la Universidad de Chicago, y el otro por Gerald J. Wasserburg, del Instituto de Tecnología de California.

Desde hace algún tiempo se ha evidenciado que muchas supernovas de la galaxia deben haber precedido a la formación del sistema solar. Los elementos más pesados que el hierro pueden formarse sólo en las condiciones extremas que prevalecen en la explosión de una supernova, y la abundancia de estos elementos en la tierra implica por tanto que el sistema solar recogió las cenizas de muchas supernovas. Se ha supuesto que el material recibido de todas las explosiones estelares estaba completamente mezclado en la nube de polvo y gas que finalmente originó el sistema solar.

Varios procesos pueden conducir a la segregación de un elemento respecto de otro en una estrella y sistema planetario en vías de desarrollo. Por ejemplo, a causa de la diferente densidad de los elementos, el sol ha acumulado la mayor parte del hidrógeno del sistema solar, mientras que la tierra se compone principalmente de elementos pesados. Pero los isótopos de un solo elemento son muy parecidos en sus propiedades químicas y físicas; se componen de átomos con un número igual de protones pero desigual de neutrones. Por consiguiente, los isótopos deberían estar distribuidos de manera uniforme por todo el sistema solar. Cada vez que se encuentre un elemento, sus diversos isótopos deberían estar presentes en igual proporción, y sea que su abundancia se mida en las rocas terrestres o en meteoritos, ya sea incluso que se deduzca del espectro solar.

Los granos estudiados por Clayton y Wasserburg son inclusiones microscópicas en las condritas carbonáceas, meteoritos de los cuales se piensa que son la más antigua materia sólida del sistema

solar. Se ha descubierto que en el interior de los granos hay proporciones anómalas de isótopos de varios elementos. Por ejemplo, el grupo de Chicago ha detectado proporciones isotópicas diferentes de las halladas en las rocas terrestres en magnesio, carbono, nitrógeno, oxígeno, neón y xenón. Una anomalía notable es la abundancia del oxígeno con masa atómica 16. En ciertas muestras hasta un 5 por ciento del oxígeno es puro oxígeno 16, sin mezcla de los isótopos oxígeno 17 y oxígeno 18, que suelen estar presentes.

No se conoce ningún mecanismo para convertir un isótopo en otro en las condiciones a que están sometidos los meteoritos (exceptuando los isótopos radiactivos que se desintegran espontáneamente siguiendo una secuencia conocida). El fraccionamiento químico podría crear pequeñas perturbaciones de las proporciones isotópicas, pero la discrepancia sería proporcional a la masa atómica, relación que no se ha observado. Por ello se ha llegado a la conclusión de que los granos pueden haber tenido un origen diferente al del resto de la materia del sistema solar.

Un respaldo especialmente firme para la hipótesis de que los granos provinieron de una supernova cercana lo proporciona un estudio iniciado por Typhoon Lee, del grupo de Wasserburg, sobre el isótopo magnesio 26. Encontró notables enriquecimientos de dicho isótopo en granos que contenían en total poco magnesio, pero grandes cantidades de aluminio. El magnesio 26 se produce por desintegración del aluminio 26, isótopo radiactivo, y la medición de las cantidades presentes en los gránulos sugiere que esa secuencia de desintegración del aluminio 26 no alcanza a un millón de años, de modo que la supernova que lo originó no puede haber explosionado sino algunos millones de años antes de que ocurriera la condensación de los meteoritos.

La hipótesis de la supernova es atractiva por otras razones. No se entiende claramente la manera en que una nube de gas y polvo puede condensarse espontáneamente para formar una estrella del tamaño del sol; antes de que la atracción gravitacional pueda vencer la presión interna del gas es preciso alcanzar una densidad crítica. La onda de choque de una supernova cercana podría proporcionar la compresión inicial necesaria. Así pues, el sistema solar no se habría formado en la vecindad de una supernova por accidente; puede que el sistema solar exista a causa de la supernova.

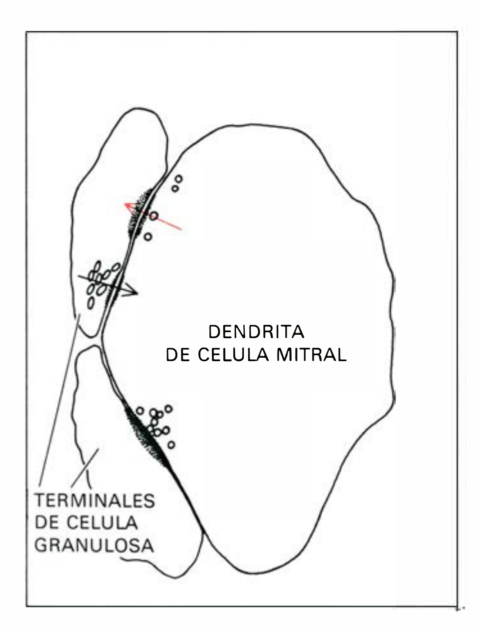


Microcircuitos del sistema nervioso

Los circuitos neuronales se suelen analizar en función de los axones, de esas largas fibras que emergen de las neuronas. Al parecer, se dan también circuitos en los que sólo intervienen las otras prolongaciones, más cortas, de las neuronas: las dendritas

Gordon M. Shepherd

Durante casi un siglo, la investigación sobre la base fisiológica del comportamiento ha estado dominada por la idea de que el sistema nervioso está compuesto por centros y por vías. Dentro de los centros se hallarían grupos de neuronas, o células nerviosas, que desempeñarían funciones específicas, como pueden ser el procesamiento de la información sensorial o el control del movimiento. Algunas células de éstas darían lugar a unas fibras largas y delgadas (una por cada célula), llamadas axones o cilindroejes, que se encargarían de transmitir la información de un centro a otro, bajo la forma de un impulso electroquímico. En consecuencia, el comportamiento implicaría la existencia de una transmisión continua de impulsos en los axones de diversas vías.



EL MICROCIRCUITO más sencillo que se halla en el cerebro es la sinapsis recíproca, un contacto especial entre dos neuronas que transmite señales excitadoras e inhibidoras. La microelectrografía de la página opuesta, realizada por Joseph L. Price en el laboratorio de T. P. S. Powell, de la Universidad de Oxford, muestra sinapsis recíprocas entre dos tipos de neuronas (células mitrales y células granulosas) del bulbo olfatorio de rata. La gran estructura ovalada del centro de la micrografía es una prolongación de la célula mitral, vista en sección; a la izquierda se observan dos terminales de la célula granulosa. La sinapsis recíproca ***(parte superior izquierda)*** **consiste en dos contactos sinápticos, uno al lado de otro. Las sinapsis emparejadas tienen polaridades opuestas, es decir, acarrean información en direcciones opuestas. Lo que es más, una es excitadora** ***(flecha de color)*** **y la otra inhibidora** ***(flecha negra).*** **La unión funciona como un bucle de retroinhibición. Aumento: 77.500 veces.**

Como es natural, esta visión tradicional del sistema nervioso tenía centrada su atención en el impulso nervioso y el axón. Los neurofisiólogos han llegado a esclarecer la forma en que se genera el impulso nervioso y los neuroanatomistas han conseguido trazar las trayectorias de los axones. Estos estudios constituyen capítulos brillantes en el desarrollo de la ciencia neurológica. No obstante, queda por contestar todavía una pregunta clave: ¿Qué es lo que controla la actividad de los axones? Todo parece que se ha de buscar la respuesta en la organización íntima de los propios centros nerviosos. Estudios recientes, relativos a las conexiones e interacciones entre neuronas en el interior de los centros nerviosos –los llamados microcircuitos cerebrales–, han empezado a proporcionarnos bases para una comprensión más profunda de los mecanismos neuronales que se hallan implicados en el comportamiento.

Dendritas y sinapsis

En el interior de cada centro, las neuronas dan lugar a dendritas: unas prolongaciones cortas y ramificadas que terminan en las inmediaciones de la célula. Hay una gran variedad en cuanto a la longitud y el modelo de ramificación de las dendritas. Algunas dendritas se ramifican poco; otras, en cambio, producen ramificaciones abundantes; unas irradian en todas direcciones, otras se reducen a un tronco único a modo de penacho. Las dendritas pueden ser no más largas de una décima de milímetro o extenderse hasta alcanzar varios milímetros. Los diversos modelos de ramificación dendrítica suelen ser específicos de las neuronas pertenecientes a distintas regiones especializadas del sistema nervioso central.

Alrededor de los años cincuenta, el microscopio electrónico hizo asequible la observación de los contactos íntimos que permiten la intercomunicación entre neuronas: las sinapsis. En estos puntos se transfiere la información de una neurona a otra, generalmente a través de unos mensajeros químicos conocidos por neurotransmisores. La sinapsis entre un axón y el soma de una neurona (cuerpo celular) se llama axosomática; si es entre un axón y una dendrita, axodendrítica. Durante muchos años, se supuso que éstas eran los dos únicos tipos posibles de sinapsis; se creía, por tanto, que la neurona quedaba funcionalmente polarizada al recibir señales por medio de sus dendritas y su cuerpo celular y que las transmitía posteriormente a través de su axón. Como veremos más adelante, el sistema nervioso tiene una mayor riqueza de recursos de lo que se podía pensar, en cuanto a la formación de circuitos sinápticos se refiere.

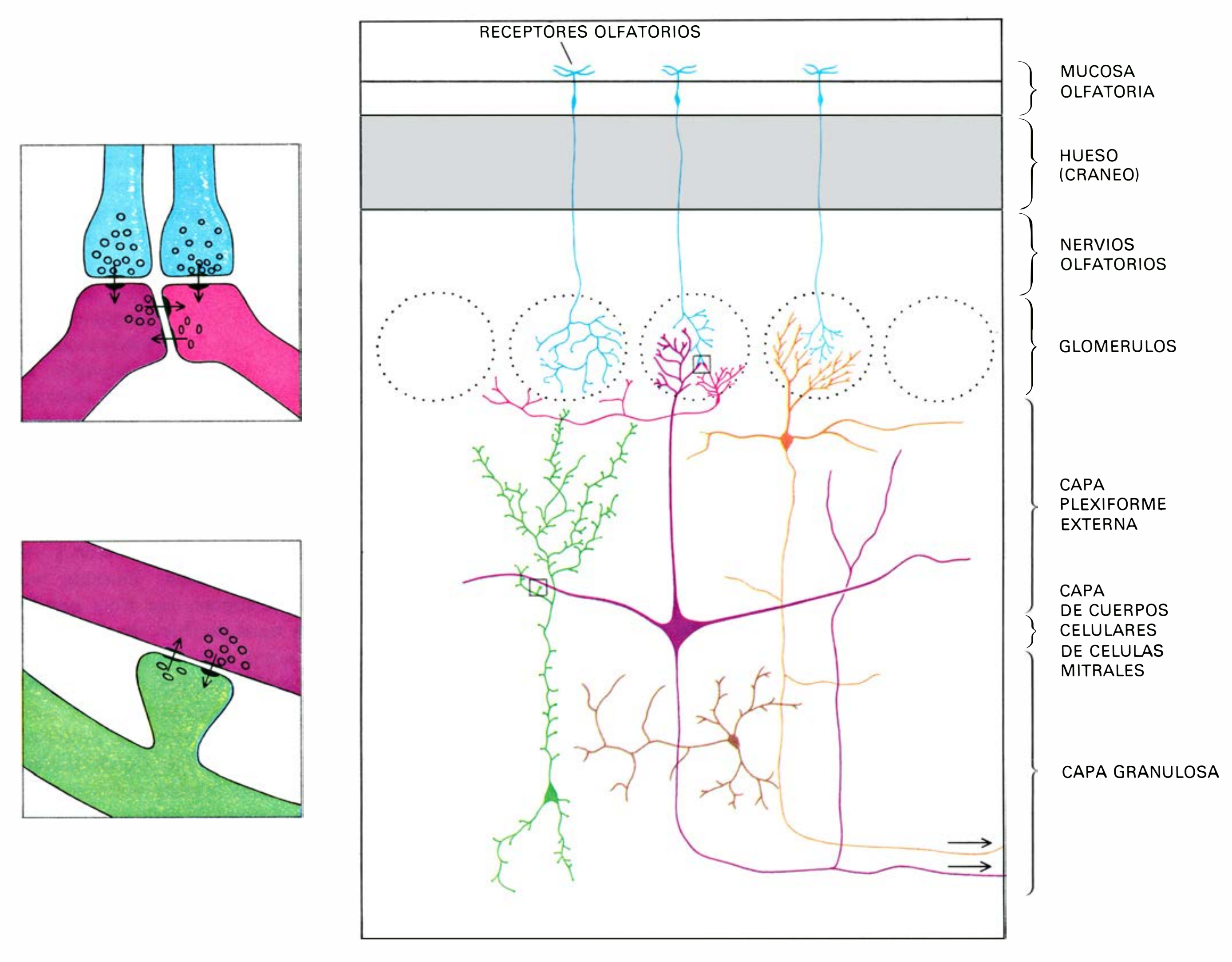
La recepción de una señal sináptica tiene por efecto inducir un potencial postsináptico: un cambio lento del potencial que existe de un lado a otro de la membrana de la célula receptora. Según de qué tipo de neurotransmisor se trate, el potencial postsináptico puede ser excitador o inhibidor. Contrariamente al impulso nervioso que viaja a lo largo del axón y que constituye un fenómeno del tipo de todo-o-nada, los potenciales postsinápticos excitador e inhibidor son graduados; ello significa que la amplitud de la

respuesta depende de la intensidad del estímulo. En las neuronas que poseen un axón largo, cuando la suma de los potenciales excitadores alcanza un determinado umbral, la célula se "dispara", es decir, origina un impulso que desciende por el axón. En cambio, cuando el estímulo excitador no alcanza el umbral o es compensado por un estímulo inhibidor, la célula no se dispara. Por tanto, las actividades relativas de la sinapsis excitadoras e inhibidoras que entran en contacto con una neurona son las que determinan la frecuencia de transmisión de impulsos a través del axón de la célula hacia otras regiones.

Las investigaciones sobre la inhibición sináptica han puesto de manifiesto que ésta puede ser mediada por axones proyectados por neuronas localizadas en centros distantes, o bien por axones pertenecientes a neuronas cuyos cuerpos celulares se encuentran en las inmediaciones del lugar de la inhibición. Veamos el caso de una neurona motora de la médula espinal de cuyo axón se desprende una rama colateral que realiza una sinapsis excitadora con una célula internuncial o interneurona, pequeña y de axón corto, llamada célula de Renshaw; luego, la interneurona de Renshaw forma una sinapsis inhibidora con la misma neurona motora. De esta manera se forma un bucle de retroinhibición que, aunque lo postuló Birdsey Renshaw, de la Rockefeller University, fue descubierto en 1954 por John C. Eccles, Paul Fatt y K. Koketsu, de la Australian National University. Por estar localizada la interneurona de Renshaw en la misma región de la médula espinal que la neurona motora que inhibe, se dice que el circuito es local, en contraposición a las largas vías axónicas que comunican un centro nervioso con otro.

El bulbo olfatorio

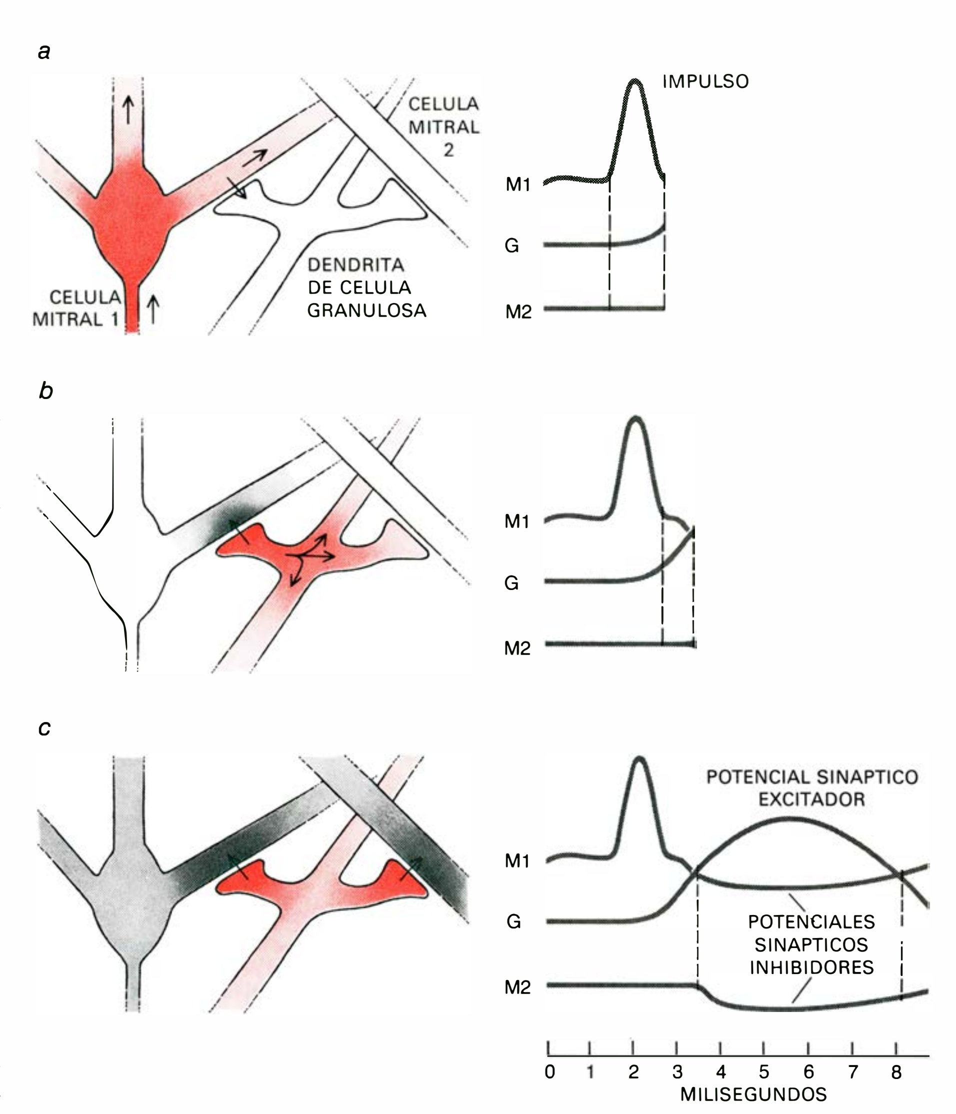
En 1959, cuando empecé mis propias investigaciones en el laboratorio de Charles Phillips, en la Universidad de Oxford, la vía de inhibición de Renshaw era el único tipo de circuito retroalimentador local que se había estudiado con deta-



EL BULBO OLFATORIO, una estación de relevo entre los receptores sensoriales de la nariz y el cerebro, contiene gran número de microcircuitos que transmiten y procesan la información olfativa. En muchos de estos circuitos, las neuronas comunican directamente entre sí a través de sus dendritas (esas prolongaciones del cuerpo celular que son cortas y ramificadas) en vez de hacerlo por emisión de un impulso que viaja a lo largo del axón o cilindroeje (la fibra nerviosa). Este esquema indica los diversos tipos de neuronas del bulbo olfatorio que nos son revelados al tratar el tejido por el método de Golgi, que vuelve obscuras tan sólo a unas pocas células si bien lo hace en la totalidad de sus prolongaciones. El bulbo está dividido en capas discretas. En el interior de los glomérulos semiesféricos, se forman sinapsis, por una parte, entre los receptores olfatorios *(en azul)* y las dendritas de las células periglomerulares *(en rojo)* y por otra, entre aquéllos y los penachos dendríticos de las células mitrales *(en morado)*. Otros tipos de células, entre las que se encuentran las células con penacho *(en naranja)*, también extienden sus dendritas hacia el interior del glomérulo. En la capa plexiforme externa, las dendritas secundarias horizontales de las células mitrales forman sinapsis con las "espinas", o terminales prominentes, que cubren las dendritas de las células granulosas *(en verde)*. La capa granulosa profunda del bulbo olfatorio contiene los axones de las células mitrales que salen del bulbo para proyectarse en la corteza, y unas neuronas de axón corto que son interneuronas *(en marrón)*. Las ilustraciones de la izquierda muestran los tipos principales de conexiones sinápticas en los glomérulos *(arriba)* y en la capa plexiforme externa *(abajo)*, tal y como se nos presentan al microscopio. En ambas regiones, hay sinapsis reciprocas entre dendritas.

lle. Phillips tenía gran interés en saber si se podrían hallar circuitos similares en otras partes del sistema nervioso central. Este constituyó el objetivo de nuestros trabajos, junto con T. P. S. Powell; y así fue como nos decidimos estudiar la organización de las neuronas en el bulbo olfatorio, que es una estructura ovalada, ligada a la parte anterior del cerebro, que hace la función de estación de relevo entre los receptores olfatorios de la nariz y la corteza cerebral olfatoria.

Son varias las ventajas que presenta la utilización del bulbo olfatorio como objeto de estudio en las investigaciones neurobiológicas. En primer lugar, las vías de entrada y de salida del bulbo están separadas: los axones de las células receptoras del olfato penetran todas en el bulbo por su parte superficial, mientras que los axones de salida emergen de una capa distinta y abandonan el bulbo por su parte profunda para proyectarse en la corteza olfatoria. Esta clara separación constituye un caso bastante poco frecuente en el sistema nervioso, y es de gran valor para el experimentador porque le permite activar las vías nerviosas de un modo específico. En segundo lugar, los tres tipos principales de neuronas que se hallan en el bulbo olfatorio se ordenan en capas discretas, lo que permite una fácil correlación entre los estudios anatómicos y los fisiológicos. En el bulbo, el tipo de neurona más importante es la célula mitral cuyo axón se alarga hasta proyectarse en la corteza olfatoria. Tiene dos clases de dendritas: unas dendritas secundarias, ramificadas, que se expanden lateralmente a partir del cuerpo celular, y una dendrita primaria, larga, a modo de tronco, que termina con un penacho de ramas. El penacho dendrítico de cada célula mitral recibe pies terminales de axones procedentes de células receptoras del olfato en el interior de una pequeña región esférica llamada glomérulo, que actúa como una suerte de estación de relevo en miniatura en el interior del bulbo.

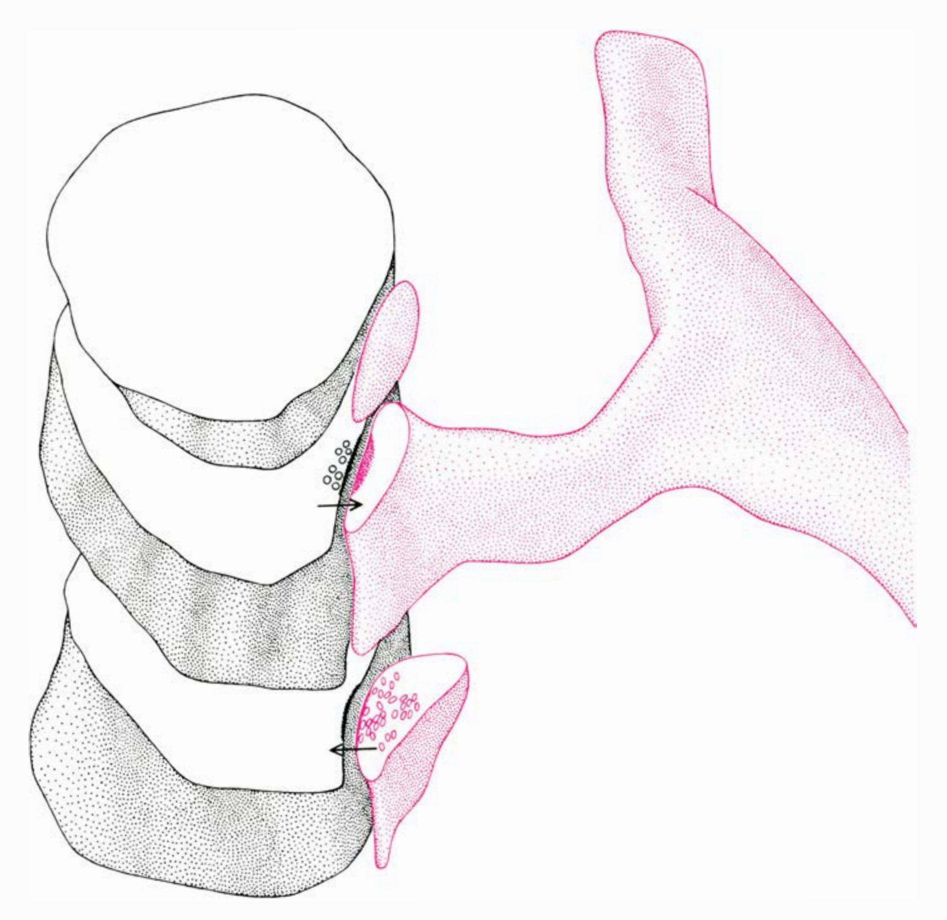


LA FUNCION DEL MICROCIRCUITO formado en el bulbo olfatorio por la célula mitral y la célula granulosa, carente de axón, se pudo deducir interpretando los resultados de experimentos fisiológicos con la ayuda de simulaciones hechas con ordenador. Aquí se observa la actividad en el circuito durante un experimento típico. En primer lugar, se estimula eléctricamente el axón de la célula mitral, lo cual provoca la formación de un impulso que es conducido, inversamente a la dirección normal, a lo largo de la fibra hasta alcanzar el cuerpo celular *(a)*. El impulso se propaga a todas las dendritas secundarias de la célula mitral, activando así las sinapsis excitadoras que realizan con las espinas dendríticas de la célula granulosa *(b)*. A su vez, la excitación de la célula granulosa activa las sinapsis inhibidoras que ponen en contacto la célula granulosa nuevamente con la dendrita de la célula mitral. Como resultado de la existencia de este bucle retroinhibidor, la célula mitral, que inicialmente estaba excitada, ve inhibida su emisión de impulsos. Por otra parte, debido a la propagación pasiva de la corriente en la dendrita de la célula granulosa, las sinapsis inhibidoras de otras partes de la dendrita funcionan inhibiendo otras células mitrales vecinas *(c)*. En condiciones normales, el impulso inicial de la célula mitral no se produce por estimulación eléctrica de su axón, sino por entrada de información procedente de las células receptoras del olfato.

Los otros dos tipos de neuronas del bulbo ven limitado su radio de prolongaciones y actividades al área del propio bulbo y, por tanto, son interneuronas por definición. Uno de los tipos es la célula periglomerular, que envía un pequeño penacho dendrítico al interior de un glomérulo y posee un axón corto que termina a poca distancia. El otro tipo es la célula granulosa, de la que emergen, en direcciones opuestas, dos largas dendritas verticales que están cubiertas de unas minúsculas "espinas" citoplasmáticas. Ya en el año 1875, el neuroanatomista italiano Camillo Golgi observó que la célula granulosa carece de axón. Este hecho hacía de la función de esta célula un enigma total: si, como decía la teoría clásica, la conducción del impulso de una neurona tenía que ser a través del axón, ¿cuál podía ser la respuesta emitida por una neurona sin axón?

Nuestros primeros estudios demostraron que, si se da un estímulo eléctrico al axón de la célula mitral, en seguida se crea un impulso nervioso que es conducido por el axón hasta invadir el cuerpo celular. (En esta situación experimental, el impulso viaja en una dirección que es opuesta a la normal.) Después de la propagación del impulso en el interior de las dendritas de la célula mitral, hay un período de inhibición. Aunque el impulso dure tan sólo uno o dos milisegundos, la inhibición resultante tiene una duración de hasta varios cientos de milisegundos, período que, en la escala de tiempos de los acontecimientos neurofisiológicos, resulta bastante largo. Nosotros supusimos que la inhibición de la célula mitral se debía a la acción de la célula granulosa. Sin embargo, seguía siendo un misterio exasperante la forma en que una célula sin axón podía funcionar como una interneurona inhibidora.

Todavía se desconocía el mecanismo de acción de la célula granulosa cuando, en 1962, me pasé al laboratorio de Wil-



RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL de una sinapsis recíproca. Muestra la espina de una célula granulosa *(en color)* formando una unión con la dendrita secundaria de otra célula mitral. En esta terminación única, en realidad hay dos contactos sinápticos con polaridades opuestas. La sinapsis dirigida de la célula mitral a la granulosa *(arriba)* presenta unas vesículas redondeadas y un espeso engrosamiento de la membrana postsináptica que es típico de las sinapsis excitadoras, mientras que la sinapsis dirigida de la célula granulosa a la mitral *(abajo)* presenta vesículas aplanadas, características de una sinapsis inhibidora. Esta reconstrucción fue hecha por Thomas S. Reese y Milton W. Brightman, en el National Institute of Neurological Diseases and Stroke, al trazar una serie de electromicrografías de 23 secciones consecutivas realizadas atravesando la unión; como puede apreciarse, no se ha omitido ninguna sección al mostrar las superficies cortadas.

frid Rall, de la rama de investigación matemática del National Institute of Arthritis, Metabolism and Digestive Diseases. Rall fue uno de los primeros en reconocer la importancia de las dendritas en la integración sináptica de la actividad neuronal y su hallazgo más notable fue el de que las corrientes eléctricas producidas en las dendritas por las sinapsis fluyen por todo el árbol dendrítico.

Sinapsis dendrodendríticas

Estas corrientes "electrotónicas" constituyen el lazo funcional entre los lugares de estimulación sináptica en las dendritas y el lugar de generación del impulso, si es que lo hay, que podría estar en el cuerpo celular de la neurona. Rall demostró que las corrientes electrotónicas y los cambios de potencial que las acompañan podían describirse con exactitud basándose en las propiedades eléctricas de las dendritas y en la geometría de sus ramificaciones. Hoy en día, sus métodos se han convertido en la base universalmente aceptada para analizar y comprender la integración sináptica en las dendritas de todo el sistema nervioso.

Nuestro trabajo conjunto consistía esencialmente en la construcción de modelos de ordenador, de las células mitral y granulosa, que representaran, de forma real, sus propiedades eléctricas y geométricas. Diseñamos un modelo de la propagación de la actividad a las dendritas de las células mitral y granulosa posterior a la conducción de un impulso en sentido inverso al normal desde el axón hasta el cuerpo celular. Conforme íbamos construyendo el modelo, íbamos modificando la simulación para que concordara mejor con los resultados fisiológicos que Phillips, Powell y yo mismo habíamos obtenido en Oxford. La secuencia de acontecimientos que más se adecuaba a los datos experimentales era realmente inesperada. Según nuestro modelo de ordenador, la llegada de un impulso a la célula mitral provocaría la activación de las sinapsis excitadoras de la dendrita secundaria de la célula mitral que contactan con las espinas de la dendrita de la célula granulosa. Este estímulo sináptico excitador despolarizaría la célula granulosa (es decir, disminuiría la diferencia de potencial que hay de uno a otro lado de la membrana celular) y activaría las sinapsis inhibidoras que vuelven a poner en contacto la célula granulosa con la célula mitral, produciéndose la inhibición de larga duración que habíamos observado. La despolarización de la célula granulosa es una respuesta graduada que se transmite por corrientes electrotónicas a la totalidad de su árbol dendrítico, de tal modo que también se activan las sinapsis inhibidoras de células mitrales vecinas.

Este esquema se apartaba totalmente de las pautas al uso, ya que postulaba la existencia de interacciones sinápticas excitadoras e inhibidoras entre dendritas, fenómeno que en aquel tiempo carecía de precedentes. Por fortuna, nos poníamos frecuentemente en contacto con Thomas S. Reese y Milton W. Brightman, que estaba estudiando la estructura del bulbo olfatorio a través del microscopio electrónico en un laboratorio cercano, perteneciente al National Institute of Neurological Diseases and Stroke. Nos emocionamos sinceramente cuando, en 1956, aprendimos que existen sinapsis reales entre las dendritas de las células mitral y granulosa. Tanto el descubrimiento de estas sinapsis dendrodendríticas como nuestro modelo funcional estaban en clara discordancia con la teoría clásica de que la neurona sólo podía recibir señales por sus dendritas y su cuerpo celular y transmitirlas por su axón, ya que parecía indicar que las neuronas podían comunicar entre sí a través de sus dendritas y sin necesidad de la intervención del axón ni de un impulso nervioso.

Los minuciosos estudios de Reese y Brightman posibilitaron la reconstrucción, en tres dimensiones, de las sinapsis dendrodendríticas del bulbo olfatorio, así como la inequívoca identificación de las mismas con las dendritas de las células mitral y granulosa. El aspecto más sorprendente de la estructura era que las sinapsis excitadoras e inhibidoras estaban distribuidas en pares recíprocos orientados en direcciones opuestas, siendo esta ordenación apropiada para mediar la postulada secuencia de una excitación procedente de la célula mitral y dirigida hacia la célula granulosa, seguida de un proceso de inhibición con dirección inversa, de la granulosa a la mitral.

Posteriormente, Anthony Pinching y Powell, en Oxford, y Edward White, en

el laboratorio de Reese, hallaron que las células periglomerulares de axón corto comunican también con el penacho dendrítico de la célula mitral en el interior del glomérulo, mediante unas sinapsis dendrodendríticas recíprocas. Por otra parte, en mi laboratorio de la Yale University School of Medicine, Thomas V. Getchell y yo mismo obtuvimos pruebas fisiológicas de que las células periglomerulares son inhibidoras en sus acciones sinápticas. Por tanto, los dos tipos de interneuronas del bulbo olfatorio comparten unas características básicas comunes en cuanto a sus interacciones con las células mitrales.

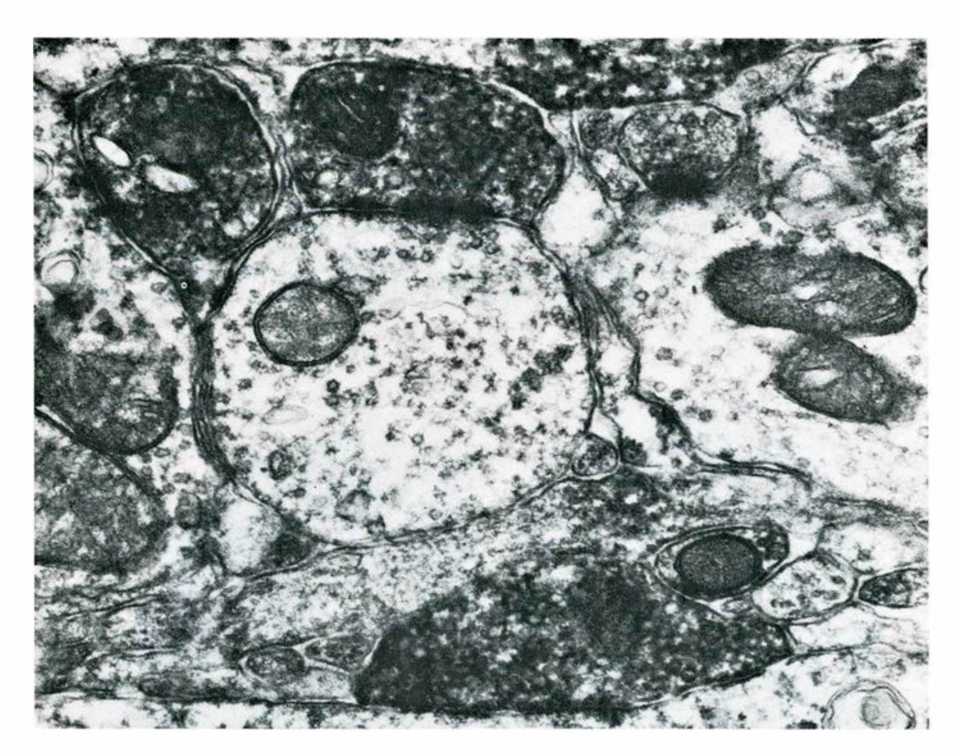
Para muchos investigadores ha sido difícil conciliar la existencia de circuitos dendrodendríticos con las nociones tradicionales de organización neuronal, basadas en circuitos formados exclusivamente por axones. A los circuitos dendrodendríticos se los ha tachado de "primitivos", "no usuales" y "no convencionales". Sin embargo, las pruebas que tenemos a disposición nos indican que las sinapsis dendrodendríticas, en sus rasgos esenciales, son similares a las sinapsis formadas por axones. Ahora parece claro que dichas sinapsis constituyen un modo lógico y económico de organizar las interacciones sinápticas en un espacio mínimo. La sinapsis recíproca entre dendritas es el circuito sináptico más compacto que se haya identificado hasta el presente en el sistema nervioso. Por tanto, podemos considerar que es un microcircuito, en el extremo opuesto de los macrocircuitos entre centros nerviosos que están formados por largas vías axónicas.

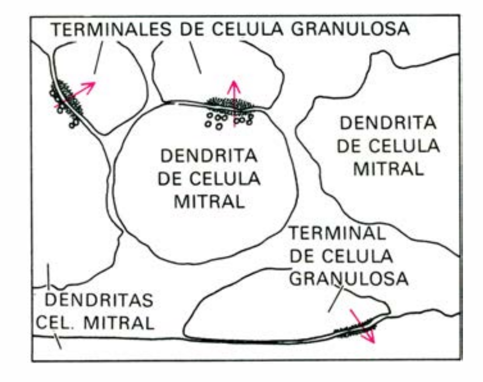
Funciones sensoriales

¿Qué relación hay entre la formación de microcircuitos entre dendritas y la función sensorial del sistema olfatorio? Una propiedad importante de los sistemas sensoriales es su sensibilidad. Al igual que otros investigadores, hemos comprobado que se pueden detectar moléculas de sustancias olorosas a concentraciones sumamente bajas en el aire, hallazgo que implica un alto grado de sensibilidad de los circuitos del bulbo olfatorio que transmiten en estas condiciones. En realidad, la situación es algo más compleja. Las simulaciones mediante ordenador que he llevado a cabo recientemente, en colaboración con Robert K. Brayton, del Thomas J. Watson Research Center, de la empresa IBM, nos ponen de manifiesto que los diversos microcircuitos del bulbo olfatorio difieren entre sí de forma marcada en cuanto a la sensibilidad de sus sinapsis al flujo de la corriente electrotónica. Por ejemplo, las sinapsis formadas por las dendritas secundarias de la célula mitral parecen tener una sensibilidad relativamente baja, ya que se activan por propagación del impulso generado en la dendrita primaria de la célula por estimulación procedente de los receptores olfatorios. En cambio, las sinapsis formadas por las dendritas de la célula granulosa parecen tener una sensibilidad relativamente alta, ya que son activadas por potenciales sinápticos graduados. También se pueden hallar sinapsis de alta sensibilidad en los glomérulos olfatorios. Sin embargo, aún falta mucho por conocer acerca de las propiedades electrónicas de las dendritas, antes de poder caracterizar, cuantitativamente, las sensibilidades de las sinapsis dendrodendríticas del bulbo olfatorio.

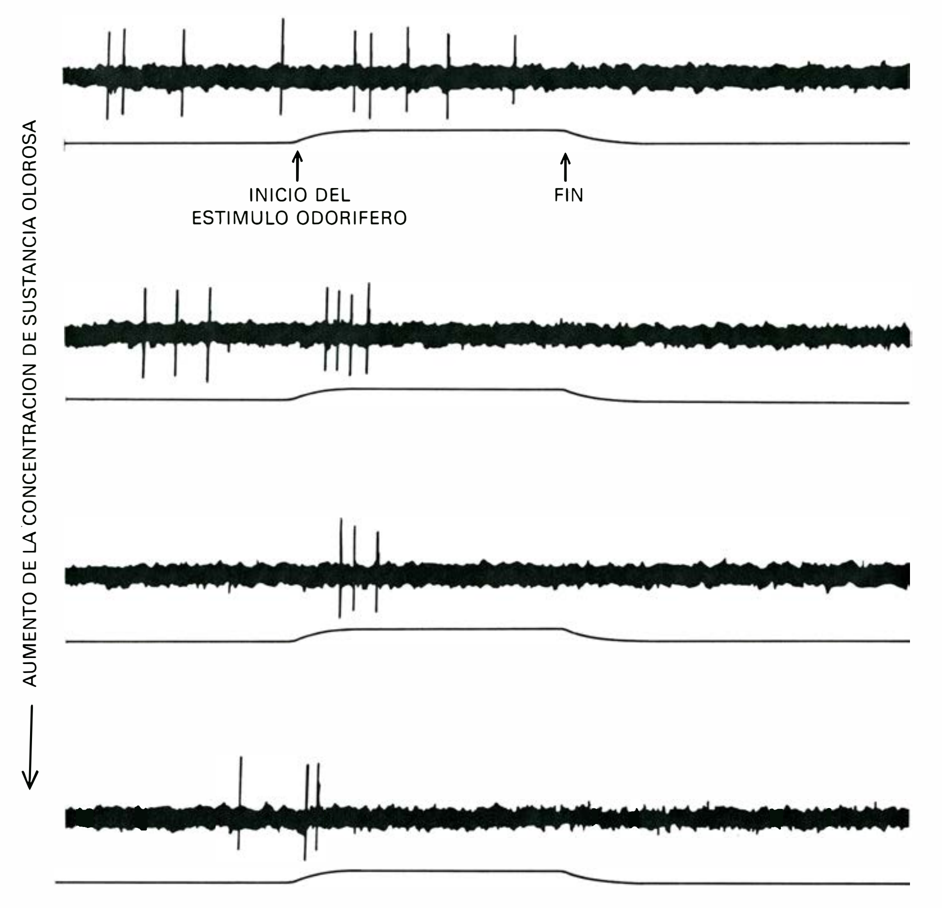
Hace poco, John S. Kauer y yo mismo hemos estado analizando las respuestas de las células mitrales del bulbo olfatorio de salamandra a diversos estímulos olfativos, mediante la utilización de una breve estimulación con sustancias olorosas a niveles de concentración rigurosamente controlados. De los resultados obtenidos en nuestro trabajo se desprende claramente que la inhibición es un factor importante que modela las respuestas de las células mitrales; actualmente, estamos intentando identificar las contribuciones específicas de los circuitos que pasan por las células periglomerular y granulosa a dicha inhibición. No sería aventurado afirmar que la capacidad para distinguir los olores entre sí depende de interacciones de la actividad excitadora e inhibidora en los circuitos dendríticos del bulbo olfatorio.

Un enfoque totalmente distinto es el que intenta correlacionar la actividad de los circuitos de las distintas partes del bulbo olfatorio con diferentes estímulos olfativos. Este fue el objetivo de Frank R. Sharp, Kauer y mío propio al utilizar una nueva técnica bioquímica, puesta a punto por Louis Sokoloff y sus colaboradores, del National Institute of Mental Health. El principio de la técnica es el siguiente: debido a que las neuronas fisiológicamente activas consumen glucosa como combustible, éstas se pueden

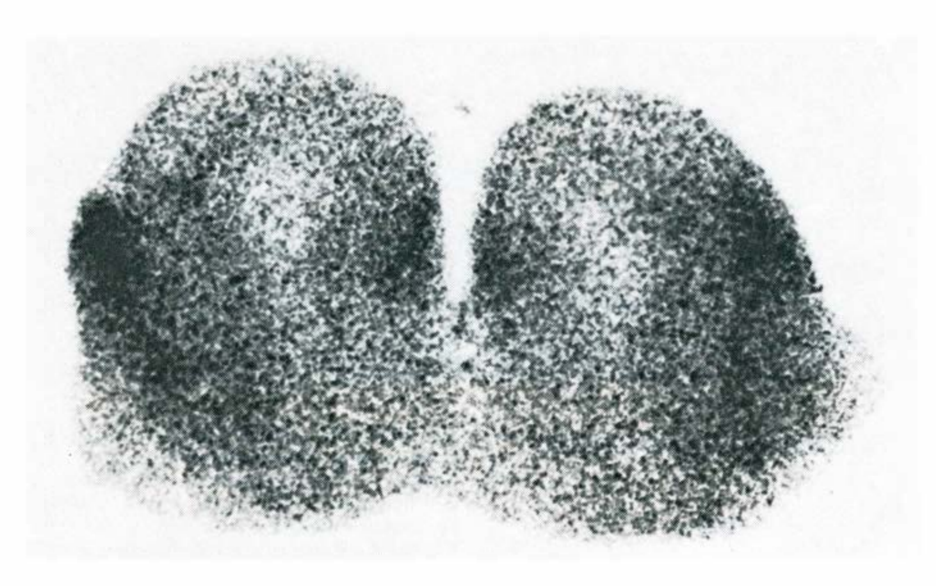




EL TIPO DE NEUROTRANSMISOR que se libera en la sinapsis inhibidora, que va de la dendrita de la célula granulosa a la dendrita de la célula mitral, pudo ser identificado mediante un estudio bioquímico llevado a cabo por Charles E. Ribak, James E. Vaughn, Kihachi Saito, Robert Barber y Eugene Roberts en el City of Hope National Medical Center, de Duarte (California). En esta electromicrografía, los terminales de la célula granulosa contienen un precipitado: una prueba positiva para el enzima glutamato descarboxilasa que convierte el aminoácido ácido glutámico en el neurotransmisor ácido gamma-aminobutírico (GABA). Ello sugiere que el GABA se libera de la célula granulosa. Aumento: 37.000 veces.



PERFILES DE LOS IMPULSOS generados por células mitrales del bulbo olfatorio en respuesta a breves estímulos de sustancia olorosa. Los registros se consiguieron implantando un electrodo extracelular; fueron realizados por John S. Kauer y el autor en la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale. La sustancia empleada era acetato de amilo, que, al olfato humano, huele como los plátanos. (El estímulo odorífero está representado por la línea inferior a partir de la flecha.) Con una concentración de acetato de amilo baja *(arriba)*, se descargaba un impulso en las células mitrales que duraba la mayor parte del tiempo de estimulación odorífera. A concentraciones mayores, los impulsos se producían con mayor rapidez y la descarga quedaba repentinamente cortada por una inhibición de larga duración. Este tipo de interacciones excitación-inhibición es el que se halla, al parecer, en la base del procesamiento de la información por parte del bulbo olfatorio.



AUTORRADIOGRAFIA DE UNA SECCION FINA, cortada a través del bulbo olfatorio, que revela los focos de actividad de los circuitos sinápticos en respuesta a un olor específico. Para conseguir esta imagen, Frank R. Sharp, Kauer y el autor le inyectaron a una rata un azúcar marcado con radiactividad, la desoxiglucosa, y luego sometieron al animal a una atmósfera que contenía vapores de acetato de amilo. Las neuronas del bulbo que eran más activas en la detección y discriminación selectiva del olor absorbieron el azúcar marcado tomándolo de la sangre. Al colocar secciones del bulbo sobre películas sensibles a los rayos X, las neuronas obscurecieron la película proporcionalmente a su radiactividad, dando como resultado un mapa de la actividad del bulbo. En la ilustración, las regiones más obscuras se localizan precisamente en los glomérulos olfatorios.

identificar si se les suministra un derivado químico de la glucosa que sea absorbido al igual que la glucosa por las células activas, pero que no puede sufrir una posterior metabolización; la sustancia queda así atrapada en el tejido. El derivado de glucosa está marcado con átomos de un isótopo radiactivo, de suerte que la radiactividad sirve para registrar su localización La radiactividad se detecta haciendo cortes finos del tejido y colocándolos sobre una película fotográfica; tras una exposición de una semana, las células radiactivas han obscurecido la emulsión de la película proporcionalmente a su actividad fisiológica cuando aún estaban vivas.

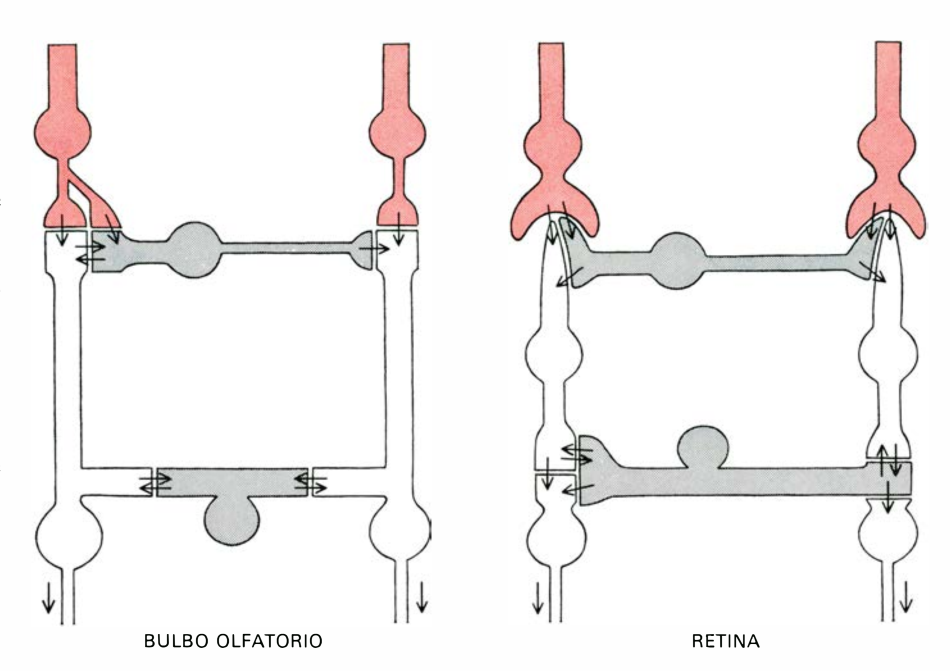
Esta técnica fue la que nos sirvió para comprobar que la estimulación del olfato está asociada a mapas espaciales de actividad en el bulbo olfatorio. Los focos de actividad se hallan localizados en grupos precisos de los glomérulos, que tienen una elevada densidad de dendritas y sinapsis. Estamos trabajando, en colaboración con William B. Stewart y nuestros colegas del laboratorio de investigación neuroquirúrgica de Yale, en el análisis de la distribución de estos lugares activos en relación con olores diversos, que incluyen a las feromonas, esas sustancias químicas que coordinan la actividad social de los insectos y de los mamíferos. El método de la glucosa es uno más de toda una batería creciente de técnicas bioquímicas que se están poniendo a disposición de los neurólogos, y promete servir de gran ayuda en lo que se refiere a la correlación de la organización sináptica con lugares y niveles de actividad funcional.

Distribución de los microcircuitos

¿Se encuentran las sinapsis dendrodendríticas en el bulbo olfatorio? Nunca surgió realmente esta posibilidad porque, mientras nosotros estudiábamos el bulbo, otras investigaciones con las que nada teníamos que ver, acometidas por John E. Dowling, a la sazón en la Johns Hopkins University, en colaboración con Brian B. Boycott, de la Universidad de Londres, pusieron de manifiesto la presencia de sinapsis similares en la retina del ojo. Se sabía que en la retina había un tipo de interneurona, llamada célula amacrina, que carecía de axón y, por tanto, planteaba el mismo problema que la célula granulosa del bulbo olfatorio. Dowling y Boycott contribuyeron a solventar el problema descubriendo sinapsis recíprocas entre las dendritas de las células amacrinas y las de las neuronas llamadas células bipolares. Trabajos posteriores llevados a cabo

por Frank S. Werblin y Dowling en 1969, y desde entonces por muchos otros investigadores, han demostrado que la mayoría de las células de la retina generan potenciales sinápticos lentos que sirven tanto de respuesta sináptica como de estimulación de la célula siguiente con la que realiza sinapsis, situación análoga a las que hemos observado en el bulbo olfatorio.

A lo largo del tiempo transcurrido desde los primeros estudios sobre el bulbo olfatorio y la retina, se han ido acumulando numerosas pruebas a favor de la existencia real de dichos tipos de circuitos sinápticos a través de dendritas en otras muchas regiones del sistema nervioso. En un principio, era difícil obtener estas pruebas; la mayoría de los neuroanatomistas estaban acostumbrados a pensar que las sinapsis estaban formadas exclusivamente por axones que incidían sobre cuerpos celulares o dendritas. Fue un duro trabajo de adaptación (y, en algunos casos, un trabajo de revisión de todos los estudios anteriores) lo que les permitió incluir, en sus esquemas, a las sinapsis entre dendritas. Hoy, sin embargo, la lista de circuitos sinápticos a través de dendritas es bastante larga, y puede afirmarse que se han encontrado dichos tipos de circuitos en casi todas las partes principales del sistema nervioso.



LA SEMEJANZA ENTRE LA ORGANIZACION SINAPTICA del bulbo olfatorio y la de la retina se hace patente en este diagrama esquemático. Ambas regiones son estaciones de relevo entre células receptoras sensoriales *(color)* y la corteza. Ambas poseen una red de vías verticales *(claras)* para la transmisión directa a través de ellas y de vías horizontales *(sombreadas)* que realizan interacciones laterales. Las conexiones horizontales están organizadas en dos capas principales e implican la existencia de sinapsis sencillas y recíprocas, que funcionan por combinaciones de potenciales graduados lentos, y de actividad de impulso del tipo de todo-o-nada. (Dibujo de Lorelle M. Raboni)

Por ejemplo, las conexiones sinápticas del nervio trigémino con el tallo cerebral han sido estudiadas por Stephen Gobel, en el National Institute of Dental Research. Este nervio conduce la información sensorial procedente de la cara y alimenta un complicado microcircuito que parece ser esencial para la integración de la información y su transmisión al cerebro. Hay varios tipos de ordenaciones sinápticas que han sido identificadas en esta región: sinapsis axodendríticas sencillas y recíprocas, sinapsis dendrodendríticas sencillas e incluso sinapsis axoaxónicas, en las que un axón recibe contacto por sinapsis con otro axón. Esta variedad de ordenaciones sinápticas sugiere la existencia de muchas pequeñas unidades integradoras que sirven para un procesamiento específico y muy localizado de la información.

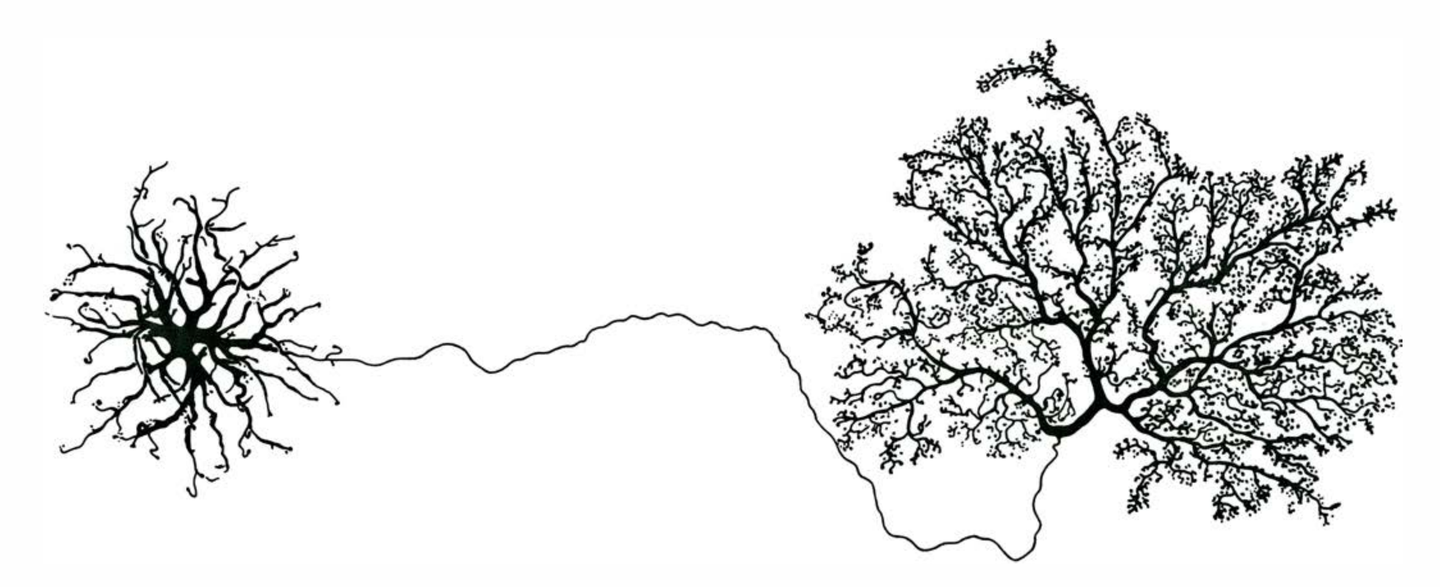
Una de las sensaciones importantes que es conducida por el nervio trigémino es la sensación de dolor. Actualmente se está investigando mucho sobre el dolor, con una amplia gama de campos que abarcan desde los mecanismos neuronales del dolor normal hasta las disfunciones responsables de los estados de dolor para los que no hay tratamiento posible y hasta la localización de los receptores opiáceos en el sistema nervioso. Parece lo más probable que, para llegar a una comprensión de estas cuestiones, se requiera un conocimiento exacto de los circuitos dendríticos que procesan las entradas de información procedentes de los nervios raquídeos y trigémino.

Hay otra región cerebral en que se han identificado circuitos dendríticos: el tálamo, que es la última estación de relevo de las vías sensoriales hacia la corteza cerebral. En el interior del tálamo, los pies terminales de axones que entran forman sinapsis con dendritas tanto de neuronas de relevo de axón largo como de interneuronas; luego, las interneuronas forman sinapsis dendrodendríticas y axodendríticas con neuronas de relevo. Por tanto, parece que una gran parte de la información que fluye hacia la corteza cerebral es procesada por microcircuitos a nivel del tálamo. También se han encontrado sinapsis dendrodendríticas en monos, en regiones que regulan el movimiento como son el área motora de la corteza cerebral y los ganglios basales del cerebro y encéfalo medio, de cuya responsabilidad se ha hablado en los trastornos del movimiento que ocurren en la enfermedad de Parkinson. Sin embargo, estas regiones son difíciles de estudiar y aún no se ha establecido la importancia cuantitativa de los circuitos dendrodendríticos y de otros tipos en estos centros.

Finalmente, citemos el ejemplo del núcleo supraquiasmático, una región diminuta situada en la parte anterior del hipotálamo, encima del quiasma óptico (la región donde el nervio óptico de un ojo se cruza con el nervio óptico del otro ojo). Fritz H. Güldner y J. R. Wolff, del Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen, han demostrado que las sinapsis dendrodendríticas constituyen un rasgo distintivo de la organización sináptica del núcleo supraquiasmático. También se han observado sinapsis recíprocas en esta región. Lo poco que se sabe de esta región sugiere que podría desempeñar un papel importante en el comportamiento cíclico lento, como los ciclos fisiológicos diarios del cuerpo, por un control sobre la liberación de determinadas hormonas. Por tanto, parece que en conjunto las sinapsis dendrodendríticas podrían estar relacionadas, no sólo con un procesamiento rápido de la información, sino también con la lenta actividad que se mide por horas o días.

Sistemas en los invertebrados

Hasta ahora hemos centrado la exposición en el sistema nervioso de los vertebrados. En los animales invertebrados, las informaciones que se han obtenido recientemente nos hablan de la existencia de un paralelismo sorprendente con los hallazgos alcanzados en vertebrados. El sistema nervioso de los invertebra-



CELULA HORIZONTAL DE RETINA de gato que pudo ser visualizada, mediante el método de Golgi, por Brian B. Boycott, de la Universidad de Londres. La célula está dividida en dos regiones muy ramificadas que están unidas por una fibra delgada. Las dendritas asociadas al cuerpo celular *(izquierda)* reciben señales principalmente de los receptores de color *(conos),* mientras que la arborización terminal *(derecha)* recibe señales esencialmente de los receptores de luz de baja intensidad *(bastones).* La formación a modo de axón que pone en contacto estas dos regiones no es capaz de generar impulsos ni tampoco permite una conducción pasiva, significativa, entre dichas regiones. En cambio, su función parece ser la de un aislante eléctrico del cuerpo celular con respecto a su arborización terminal, a pesar de mantener una unión trófica con ella. En algunos mamíferos, esta distribución parece restringir las interacciones entre los sistemas de conos y bastones, que tienen márgenes funcionales dinámicos diferentes. La ventaja de las neuronas únicas con regiones eléctricamente aisladas entre sí es que se puede incrementar el número de unidades integradoras independientes en el seno del cerebro, sin haber de aumentar el número de células individuales.

CORTEZA CEREBRAL

GANGLIOS BASALES

TALAMO

NUCLEO SUPRAQUIASMATICO

NUCLEO TRIGEMINO

MICROCIRCUITOS TIPICOS de distintas regiones del cerebro. Los marcos representan de forma esquemática los contornos de los pies terminales y la localización de las sinapsis; el sombreado de las dendritas es de color, el de los axones gris. Las conexiones sinápticas en el tálamo y en el núcleo trigémino están organizadas formando grupos; las conexiones en otras regiones tienen una distribución más difusa que la que aquí se indica. Las funciones de los circuitos van desde el proceso rápido de la información hasta la generación de ritmos de período largo.

dos se caracteriza por una organización en una cadena de ganglios o pequeños centros nerviosos. En el interior de cada ganglio, los cuerpos celulares de las neuronas se hallan en la periferia; las dendritas surgen del axón y se ramifican mezclándose unas con otras en el centro del ganglio, a cierta distancia de los cuerpos celulares. Esta separación ha complicado en gran manera la identificación de las células de las que surgen las dendritas. Sin embargo, David King, de la Universidad de California en San Diego, ha podido reconstruir, no hace mucho, los terminales dendríticos en el interior del ganglio de bogavante y ha comprobado que un terminal dado puede tener sinapsis emisoras y receptoras. Junto con otros resultados similares, éstos parecen confirmar que los tipos básicos de sinapsis dendrodendríticas también se hallan en el sistema nervioso de los invertebrados, y que algunas de las ordenaciones de interconexión son similares a las halladas en el sistema nervioso de los vertebrados.

A menudo, los neurofisiólogos han querido sacar ventaja de la relativa simplicidad del sistema nervioso de los invertebrados para explorar las propiedades fundamentales de las neuronas. Ya en 1959, se registró la actividad electrofisiológica de varios tipos distintos de neuronas en ganglios de invertebrados, implantando finos electrodos de vidrio en células individuales. Al hacer una revisión de estos estudios, Theodore H. Bullock, que a la sazón se hallaba en la Universidad de California en Los Angeles, llegó a la conclusión de que las funciones normales de muchas de las pequeñas neuronas de ganglios de invertebrados podrían estar mediadas por potenciales graduados más que por generación de impulsos nerviosos del tipo de todo-o-nada. Fue difícil obtener, en neuronas de invertebrados, pruebas que apoyaran esta hipótesis, debido a la separación entre el cuerpo celular, donde se realizaban los registros, y los terminales dendríticos, donde se da la sinapsis. Sin embargo, se acaban de encontrar varios ejemplos de neuronas que comunican exclusivamente por potenciales graduados.

Llaman particularmente la atención los resultados obtenidos por Keir Pearson y C. R. Fourther, de la Universidad de Alberta, en el sistema nervioso de la cucaracha. Las patas de la cucaracha salen del tórax y la marcha está controlada por impactos alternativos, emitidos en forma de impulsos, por los nervios procedentes de los ganglios torácicos y dirigidos a los músculos flexor y extensor de las patas. La naturaleza rítmica y recíproca de esta actividad se debe a los propios ganglios. Pearson y sus colaboradores han demostrado que la generación de este ritmo motor viene determinada por la presencia en dichos ganglios de unas neuronas "antidisparos" (*véase* "El control de la marcha", de Keir Pearson; INVESTIGACION Y CIENCIA, febrero, 1977).

Otras interacciones locales

En este informe sobre microcircuitos, he venido poniendo el énfasis sobre las interacciones dendrodendríticas, pero también podría apuntar algunas regiones en que hay interacciones entre axones (sinapsis axoaxónicas), o al menos se sospecha de su presencia. Por otra parte, he prestado especial atención al papel de los potenciales graduados en los microcircuitos; no obstante, impulsos nerviosos del tipo de todo-o-nada se dan también en los axones cortos, en ramas colaterales de axones y en algunas dendritas. Además, aunque la mayoría de las sinapsis desempeñen su función mediante la liberación de neurotransmisores químicos, existen varias regiones especializadas llamadas "uniones cerradas" (puentes de baja resistencia) en que la transmisión se produce por un flujo directo de la corriente eléctrica. Finalmente, también hay interacciones entre neuronas que se dan independientemente de unos puntos de contacto específicos; incluyen al flujo continuo de sustancias en el interior de las neuronas y a través de sus membranas, y abarcan también los campos eléctricos que se crean cuando se activan simultáneamente poblaciones enteras de neuronas. Todos estos fenómenos contribuyen a las operaciones funcionales que se desempeñan en los microambientes del sistema nervioso.

En 1973, en un congreso del Neurosciences Research Program celebrado en Boston y organizado por dicha organización interdisciplinaria, dedicada a promover encuentros científicos con el fin de discutir los problemas actuales en el campo de la neurología, se hizo una revisión de todos los nuevos trabajos sobre organización sináptica. En esta edición, organizada por Francis O. Schmitt, de dicha entidad, y dirigida por Pasko Rakic, de la Harvard Medical School, se usó el término "circuitos locales" para describir las vías limitadas al interior de los centros nerviosos. Se puede considerar que las vías que pasan por dendritas halladas en el bulbo olfatorio constituyen el prototipo de los circuitos locales, al estar caracterizadas por conexiones locales desde el punto de vista anatómico y por potenciales locales desde el punto de vista fisiológico.

Microcircuitos y comportamiento

¿Qué relación hay entre estas investigaciones a nivel microscópico sobre la organización nerviosa y las acciones a gran escala que caracterizan al comportamiento? Los tipos más sencillos de microcircuitos están relacionados con las propiedades de excitación y de inhibición sináptica y con secuencias diversas de ambas actividades. En muchos casos, al igual que ocurre en el bulbo olfatorio y en la retina, los modelos según los que se organizan las sinapsis son complicados, aunque estereotipados, lo que sugiere que algunos microcircuitos podrían estar organizados formando unidades de microproceso más complejas, en las que cada microcircuito contribuiría a la integración local con una función determinada.

A partir de consideraciones como las anteriores se está poniendo en evidencia que el sistema nervioso está construido de jerarquías de unidades funcionales, con una complejidad e importancia funcional creciente. El concepto tradicional de la neurona única que recibe información por sus dendritas y la transmite por su axón puede ser considerado actualmente como la representación de un solo tipo de unidad funcional dentro de las jerarquías mencionadas. Los nuevos experimentos indican que una sola neurona puede contener muchas unidades funcionales en cuanto a sus relaciones sinápticas individuales. Por otra parte, cualquier neurona dada es tan sólo un pequeño componente de unidades funcionales mayores formadas por ensamblajes multineuronales.

En los niveles superiores de la organización nerviosa, funciones tales como la percepción, la memoria, el aprendizaje y los actos conductuales complejos son hechos que exigen una coordinación de un gran número de centros. En dicha coordinación, un microcircuito y un macrocircuito no constituyen entidades separadas; el primero se halla indisolublemente incluido en el segundo. En consecuencia, tanto si uno empieza a interesarse por los aspectos bioquímicos del comportamiento como si investiga la actividad eléctrica que está en la base de la conducta, llegará a un foco común: el circuito sináptico que pasa por las dendritas. Aunque aún sea un objetivo muy remoto la comprensión de la base neuronal del comportamiento, tenemos ya algunas claves de indagación; sólo hay que esperar que las investigaciones, antes o después, den su fruto.

Plantas carnívoras

Los mecanismos de atracción, captura y digestión que han desarrollado para "devorar" insectos aumentan su suministro de nutrientes minerales y afincan su supervivencia en los hábitat en donde son pocas las plantas que pueden vivir

Yolande Heslop-Harrison

Las plantas verdes vasculares –todos los vegetales que tienen verdaderas raíces, tallos y hojas y un sistema desarrollado de vasos para la conducción de agua y de nutrientes– obtienen su energía del sol, su carbono de la atmósfera y su agua y elementos minerales del suelo. El carbono atmosférico (en forma de dióxido de carbono) y los nutrientes del suelo se recuperan a partir de los desechos de los microorganismos y de los animales herbívoros y, de este modo, las plantas y los animales son complementarios en la economía general de la naturaleza. Unas cuantas plantas, sin embargo, han logrado, por evolución, la capacidad de alimentarse directamente de animales, complementando su nutrición con la captura y digestión de presas de dicho reino. Gracias a la adopción de este hábito, han conseguido la capacidad de sobrevivir en ambientes pobres en nutrientes, a expensas, en algunas ocasiones, de no poder hacerlo en hábitat más ricos en competencia con especies que tienen un modo de vida más común.

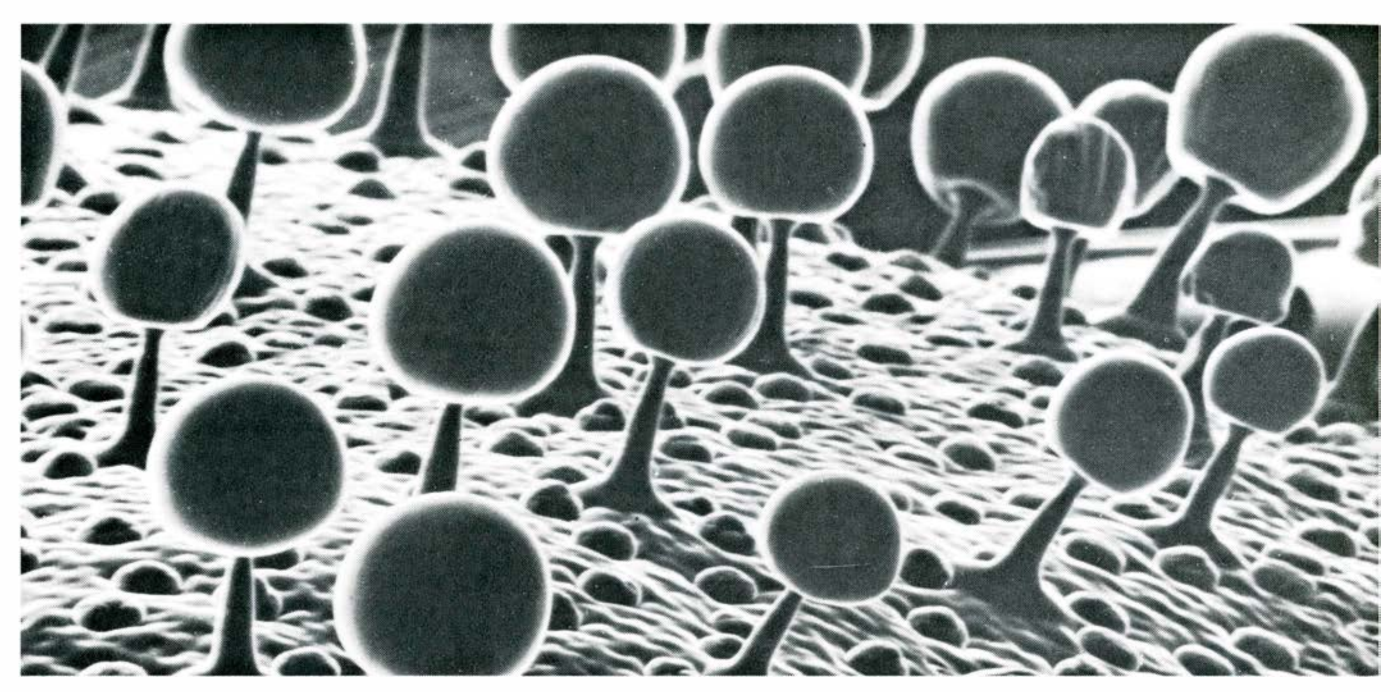
Las plantas con flores que han conseguido el hábito carnívoro pueden dividirse en dos grandes grupos, de acuerdo con el modo de capturar a la presa: atrapadoras activas y atrapadoras pasivas. De los capturadores activos, *Dionaea muscipula* es uno de los más familiares. En la naturaleza, esta especie se encuentra solamente en ciertos hábitat de las llanuras costeras de Carolina del Norte y de Carolina del Sur. Hoy, sin embargo, se cultiva ampliamente y puede encontrarse incluso a la venta, como novedad, en los mostradores de los supermercados. Sus presas naturales son, principalmente, insectos saltadores y marchadores y arañas. Al entrar la presa en contacto con la hoja, se agitan los pelos táctiles; esta acción dispara el mecanismo de captura que determina que la hoja se cierre a modo de bisagra.

Un mecanismo muy similar de trampa, a escala más reducida, se encuentra en otro género afín, de la misma familia vegetal: *Aldrovanda*, una planta acuática. El género incluye solamente una especie *A. vesiculosa*, pero tiene una distribución muy amplia, encontrándose en Europa Central y Meridional y, hacia el este, en Asia, hasta el Japón y parte de la India, y en Australia. El más común de todos los géneros de atrapadores activos es el género *Utricularia*, que comprende unas 150 especies. En las variedades acuáticas o semiacuáticas de este género, la trampa toma la forma de pequeñas vejigas de paredes elásticas, de donde el calificativo de su nombre científico. Cuando la vejiga está "preparada" tiene forma aplanada y su entrada se halla obturada por un velo de células. La presa es arrastrada al interior de la vejiga por la corriente de agua producida cuando las paredes se dilatan determinando la apertura del velo, acción que está condicionada a unos pelos táctiles situados cerca de la entrada de la vejiga.

Entre los atrapadores pasivos se encuentran las plantas jarro, cuya presa se captura y digiere en estructuras parecidas a cántaros formadas por modificación de toda la hoja, como en el género norteamericano *Sarracenia*, o por una extensión del ápice foliar, como en el género *Nepenthes* de distribución tropico-oriental. Se atrae la presa hacia el interior del jarro mediante colores y aromas, al igual que los insectos polinizadores se ven atraídos por las flores; allí es atrapada y digerida en el líquido de la trampa. Hallamos una estrategia diferente en plantas con hojas parecidas a papel atrapamoscas, como en las especies de *Pinguicula* y *Drosera*. En estos géneros existen glándulas en la superficie de la hoja que segregan unas gotas adhesivas. La presa, casi siempre un insecto volador, atraída por el olor o el color o, en su caso, por la refracción brillante de las pequeñas gotas, es capturada por el adhesivo cuando se posa. En sus esfuerzos por escapar queda más firmemente unida a la superficie de la hoja, pues no hace otra cosa que excitar a más glándulas.

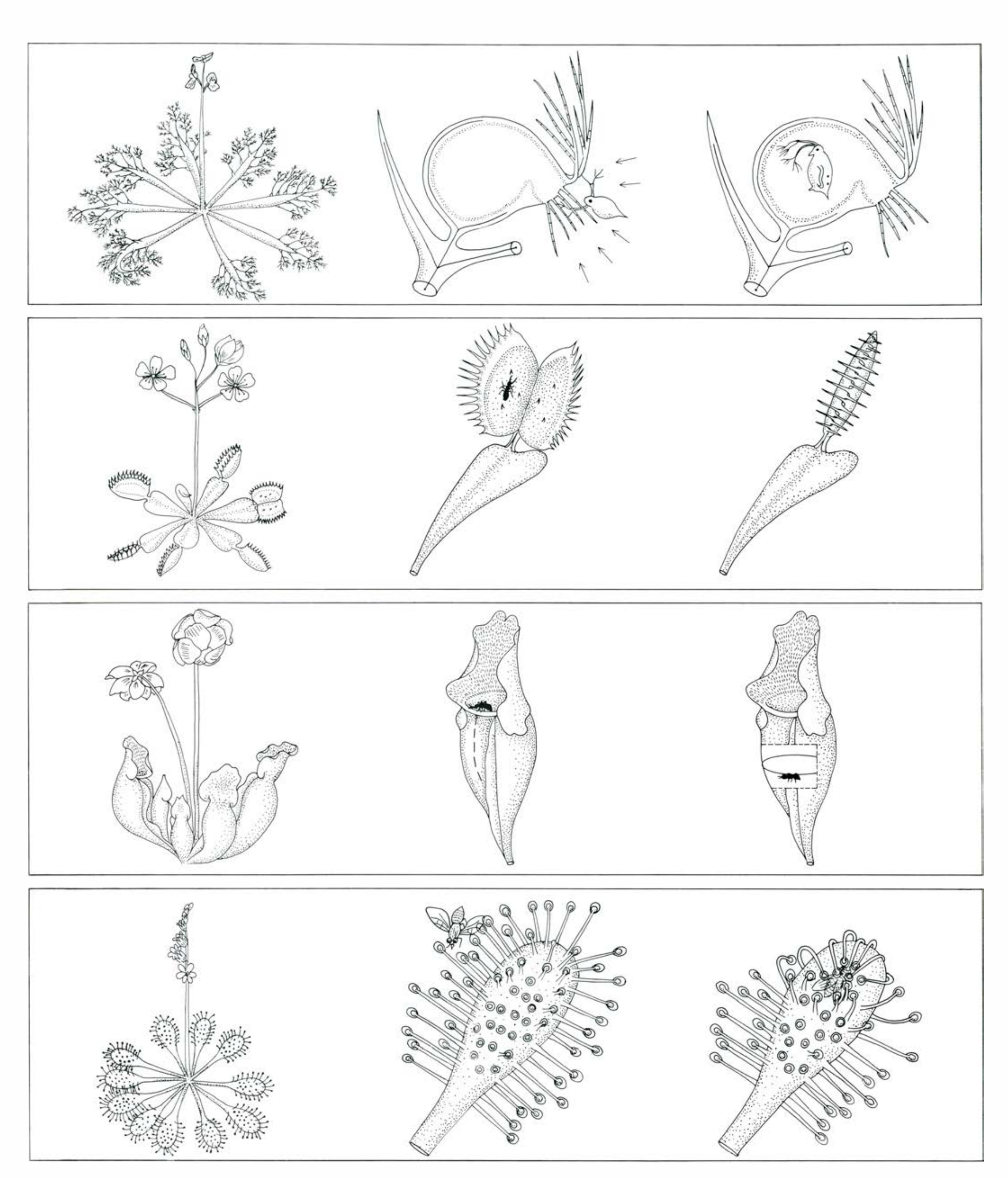
La eficacia depredadora de las plantas carnívoras ha quedado bien demostrada para algunas especies y las listas publicadas de especímenes animales capturados son notablemente amplias. Las presas suelen ser bastante pequeñas, aunque se han hallado hasta ratoncillos en los jarros de *Nepenthes*, probablemente víctimas de una caída fortuita, y restos de ranitas arbóreas en las trampas de *Sarracenia*. A veces, las *Utricularia*, llegan a capturar peces pequeños y renacuajos, pero sus vejigas, vacías, no sobrepasan unos pocos milímetros; están mejor adaptadas para la captura de rotíferos, copépodos y larvas acuáticas de ciertos insectos, como los mosquitos por ejemplo.

La cantidad de presas capturadas es, a veces, bastante grande. En las plantas jarro, las trampas perduran generalmente varios meses y pueden quedar virtualmente llenas de los restos de sus víctimas. En plantas con trampas más efímeras, como las especies de *Pinguicula*, en las que la vida efectiva puede ser solamente de cinco días, es muy difícil calcular el total de capturas durante una estación de crecimiento. *Pinguicula grandiflora* desarrolla una nueva hoja aproximadamente cada cinco días, lo que da un área total de 400 centímetros cuadrados de superficie de captura producidos en una sola estación, a pesar de que el diámetro de la roseta de hojas nunca excede los ocho centímetros. Las plantas carnívoras pueden llegar a formar densos tapices. Hace cerca de 30 años, Francis W. Oliver, del University College London, describió un césped de *Drosera* que se extendía por una superficie de alrededor de una hectárea cerca de Barton Broad (no lejos de la costa de Norfolk en Inglaterra oriental) que había capturado un



DISPOSICION DE LAS GLANDULAS en *Pinguicula grandiflora,* tal y como se aprecia en una fotografía del microscopio electrónico de barrido. Las glándulas pedunculadas prominentes capturan a los insectos presa. Las menores, semihundidas y dispersas por la superficie, son las glándulas digestivas; una vez capturado el insecto, segregan un flujo rico en enzimas. Estas glándulas absorben luego los productos de la digestión.

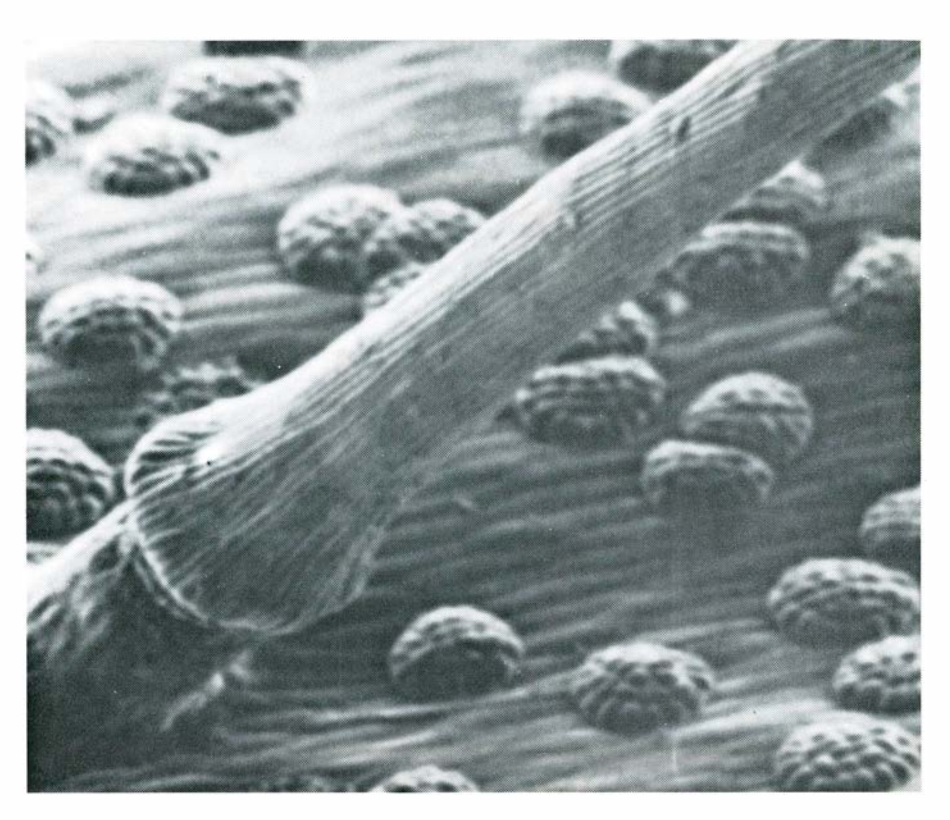
HORMIGA CAPTURADA, firmemente adherida a la superficie foliar de una *Pinguicula* mediante filamentos de mucílago secretado por las glándulas pedunculadas de la hoja. A su alrededor se aprecian glándulas pedunculadas inalteradas. La cabeza de la hormiga *(izquierda)* tiene uno de los filamentos adhesivos unidos a una pieza bucal y otro cerca de la antena derecha; un tercer filamento está adherido al tórax *(arriba, derecha)* y otros dos aseguran el extremo del abdomen *(abajo, derecha).* Las pedunculadas no han empezado todavía a secretar el jugo digestivo.



ATRAPADORAS ACTIVAS Y PASIVAS de entre las plantas carnívoras. Arriba aparece *Utricularia inflata,* una especie americana de amplia distribución que tiene hojas flotantes en la base del pedúnculo floral. Las vejigas son trampas de succión sumergidas. Cuando una presa nadadora, por ejemplo, un pequeño crustáceo del género *Daphnia,* roza los pelos táctiles que están alrededor de la apertura de la vejiga *(centro)*, el velo de tejido que forma la "puerta" se abre y la vejiga se expande rápidamente y succiona a la vez agua y presa *(derecha)*. La segunda, empezando por arriba, es otra atrapadora activa, *Dionaea muscipula,* con su roseta basal de hojas articuladas. Cuando un insecto o araña atraído roza unos de los pelos táctiles de la superficie de la hoja, las dos partes del limbo se cierran rápidamente una contra la otra, cerrando la trampa. La tercera es una atrapadora pasiva: la planta jarro *Sarracenia purpurea,* que muestra su roseta basal de hojas transformadas en jarro-trampa. La presa es atraída hacia la boca del jarro mediante un rastro de néctar *(línea discontinua)* y cae en el líquido digestivo del que no puede salir. En esta especie, en particular, la planta no contribuye mucho a las propiedades digestivas del líquido del jarro; la principal acción digestiva se debe a la flora bacteriana comensal. En otras especies de plantas jarro, glándulas especiales situadas por debajo de la superficie del fluido del jarro segregan enzimas, al menos al principio de la vida de la trampa. Debajo, otro tipo de atrapador pasivo: una trampa adhesiva ejemplificada por *Drosera intermedia.* Los pequeños insectos voladores que, atraídos por los colores de la hoja, tocan los glóbulos de secreción caen atrapados por las glándulas pedunculadas. Estas segregan los enzimas digestivos y absorben los productos de digestión.

inmenso número de mariposas, la mayoría de las cuales fueron atrapadas cuando se asentaban tras el vuelo migratorio desde el continente. Oliver encontró de cuatro a siete mariposas adheridas a cada planta y estimó el número total de insectos atrapados del orden de seis millones.

¿Cuál es, entonces, el valor de la capacidad carnívora de las plantas? Charles Darwin, que fue uno de los pioneros en la investigación de la fisiología de las plantas carnívoras, resolvió la cuestión hace poco menos de un siglo. Con su hijo Francis demostró convincentemente que ejemplares de *Drosera* en cultivo artificial, mediante el suministro de insectos a sus hojas, crecían más vigorosos, producían más flores y formaban más semillas que aquellos otros a los que no se les aplicaba este alimento. Más recientemente, Richard Harder, de la Universidad de Göttingen, y otros han demostrado que las *Utricularia, Drosera* y *Pinguicula* cultivadas en ambiente controlado, con acceso a los nutrientes cuidadosamente regulado, tenían mayor rendimiento cuando se les suministraba presas, confirmando los resultados obtenidos por Darwin. Comprobaron también que las *Pinguicula* hacían uso del polen transportado por la atmósfera, digiriéndolo de igual modo que digieren a los insectos.



BASE DE UN PELO TACTIL de la superficie de una hoja de *Dionaea muscipula*, tal y como aparece al microscopio electrónico de barrido. Las pequeñas protuberancias son las glándulas que segregan el fluido digestivo y que absorben los productos de la digestión cuando la trampa se cierra. El flujo de la secreción no secunda automáticamente el funcionamiento de la trampa, sino que depende de estímulos químicos provocados por la presa. (Micrografía obtenida por la propia autora.)

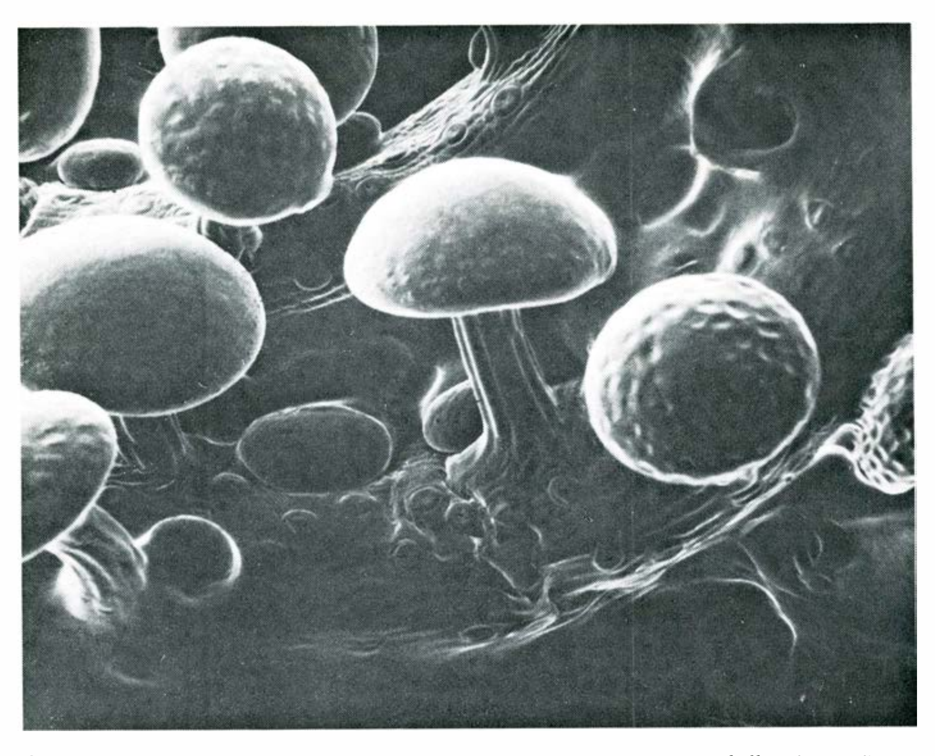
Los nutrientes obtenidos de la presa capturada entran en las hojas con sorprendente rapidez. Hace algunos años, Bruce Knox y yo misma usamos proteína de algas marcada con el isótopo radiactivo 14 del carbono, al objeto de seguir los desplazamientos de los productos de digestión de la planta. Se abasteció a las hojas de *Pinguicula* con pequeñas cantidades de proteína marcada; y se siguieron los productos de hidrólisis por medio de autorradiografía. Encontramos que los aminoácidos y péptidos producidos por la digestión de las proteínas se trasladaban al interior de las hojas en dos o tres horas e ingresaban luego en el tallo y en las raíces y zonas de crecimiento en menos de 12 horas. La ruta principal que se seguía, a través de la hoja, era el xilema, el tejido conductor de agua de la planta.

Recientemente, John S. Pate y Kingsley Dixon, de la Universidad de Western Australia, marcaron moscas del vinagre gracias a la alimentación de las mismas mediante levaduras que contenían el isótopo 15 del nitrógeno y utilizaron tales moscas como dieta para *Drosera*. En ésta, el crecimiento tiene lugar a partir de cormos desarrollados durante la estación precedente; y gran parte de la reserva nitrogenada se encuentra en forma del aminoácido arginina. Pate y Dixon hallaron, al final del experimento, cerca del 40 por ciento de la arginina en el cormo de las plantas experimentales marcado con nitrógeno 15, una demostración palpable de la importancia del aporte de nutrientes a partir de las presas para la supervivencia de la especie en la naturaleza.

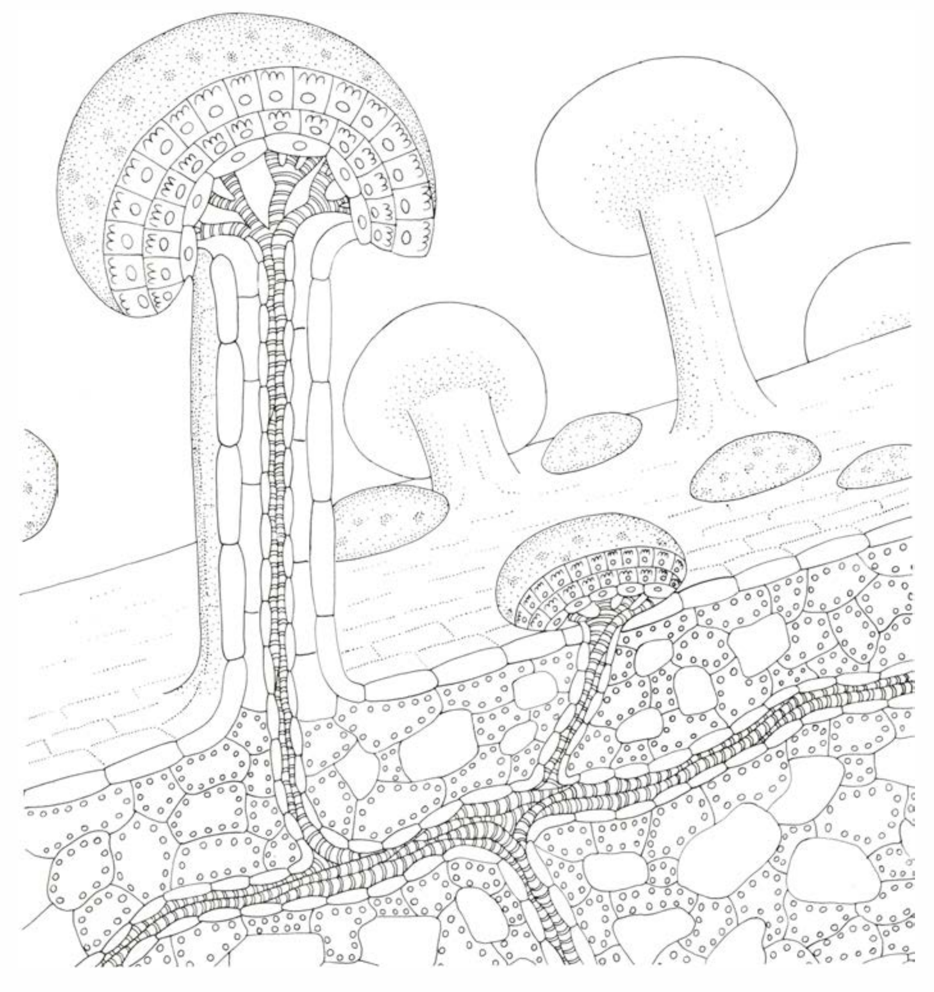
En la actualidad existen cerca de 250.000 especies de plantas con flores; de ellas, se sabe que solamente unas 400 son carnívoras. Estas se encuentran en unos 13 géneros pertenecientes a seis familias. Algunas de estas familias son muy distintas, con miembros en todos los continentes. Si la función principal del hábito carnívoro es proporcionar nutrientes que escasean, se podría esperar que estas plantas viviesen en los tipos de ambientes en los que este suplemento podría ser más benéfico. Esto es precisamente lo que se ha encontrado. Las plantas carnívoras se hallan más a menudo en comunidades pobres en nutrientes: en brezales o en pantanos, en suelos empobrecidos de bosques abiertos y, ocasionalmente, en las margas, suelos desmenuzados arcillosos asociados con caliza descompuesta. A menudo, dos o tres géneros distintos de plantas carnívoras pueden encontrarse juntos en estas localidades. Por ejemplo, en Pine Barrens de New Jersey existen algunas especies de *Drosera*, plantas jarro y *Pinguicula*.

Al mismo tiempo, ciertas especies de carnívoras ocupan nichos ecológicos muy particulares. Algunas *Utricularia* de Sudamérica se encuentran en reservorios de agua que se acumulan únicamente en cuencas naturales formadas por las hojas en roseta de bromeliáceas, que son miembros de la familia de la piña americana. En este ambiente están, en líneas generales, libres de competencia. Ciertas especies del género *Heliamphora* de plantas jarro proporcionan otro ejemplo. Se encuentran solamente, de modo natural, en la remota zona alta de las montañas que constituyen la frontera entre la Guayana y el Brasil; sus requerimientos ambientales son tan peculiares que estas plantas solamente se pueden mantener en invernadero con grandes dificultades. Aún otro ejemplo es la planta cobra de Norteamérica, la única especie de la planta jarro *Darlingtonia*; su distribución está limitada por las pendientes montañosas y los pantanos costeros de Oregón y California.

Cierto número de plantas carnívoras son capaces de sobrevivir en ambientes



GLANDULAS PEDUNCULADAS Y NO PEDUNCULADAS de *Drosophyllum* fotografiadas con un microscopio electrónico de barrido. También en *Pinguicula* existen dos tipos de glándulas, unas para capturar y otras para digerir las presas; ambas plantas pertenecen a familias distintas.



ANATOMIA DE LAS GLANDULAS de *Drosophyllum* en un esquema basado en el estudio original de C.A. Fenner. Los dos tipos de glándulas, las pedunculadas que secretan el mucílago adhesivo y las sésiles que sintetizan enzimas una vez la presa es atrapada y que reabsorben los productos de digestión, están conectadas con el sistema vascular de la hoja o sistema de vasos conductores.

muy extremos. *Sarracenia purpurea,* una de las nueve especies americanas de este género de plantas jarro, se encuentra desde Florida hasta la Columbia Británica y Newfoundland. En el límite norte de su distribución geográfica, los pantanos en donde vive permanecen helados durante varios meses de la estación fría.

En Australia (donde se registran más especies de *Dionaea* que en todo el resto del mundo) algunas nativas del norte se encuentran expuestas a temperaturas nocturnas cercanas a la congelación en los meses de invierno húmedo, época en la que crecen activamente, y entran en letargo durante la estación seca veraniega, cuando las temperaturas diurnas en las depresiones de las rocas graníticas en que habitan pueden exceder de los 50 grados Celsius. La única especie del género *Drosophyllum,* del Mediterráneo Occidental, que es una capturadora pasiva, se muestra relativamente resistente a la sequía durante su período principal de crecimiento. Se encuentra en las llanuras costeras arenosas y secas de Portugal y Marruecos y depende de la humedad marina para completar su suministro de agua.

Contemplando el rango de adaptaciones que se encuentran en conjunto en las plantas carnívoras, se puede apreciar fácilmente la asunción de Darwin al tomarlas como ejemplos de eficacia evolutiva. Los propios mecanismos de captura representan elaboradas modificaciones de las hojas o de órganos foliares; están generalmente asociados a señuelos y guías que inducen y dirigen a las presas hacia o dentro de las trampas. Glándulas especializadas segregan los enzimas digestivos, y las mismas glándulas u otras capturan los productos de la digestión y los conducen a su través para su distribución por la planta, vía los tejidos conductores, hasta las zonas de crecimiento. Ninguna de las estructuras individuales –trampas, señuelos, olores, guías direccionales, glándulas secretoras y glándulas absorbentes– es por sí misma característica de las carnívoras. Muchas plantas tienen partes foliares capaces de movimiento rápido; así, la *Mimosa pudica,* que es la sensitiva; otras han elaborado mecanismos atractivos de insectos asociados a la polinización; por fin, son muchas las familias cuyos miembros tienen glándulas capaces de segregar agua, sal, mucílago, azúcares, proteínas y otros productos. Es el conjunto de estas estructuras lo que da el carácter único a las plantas carnívoras, el integrar juntas muchas adaptaciones individuales en una combinación funcional dirigida a

una finalidad tan insólita para las plantas fotosintéticas que parece grotesca y hasta macabra.

Los estudiosos de la morfología vegetal se han interesado desde hace tiempo por las características especiales de las plantas carnívoras. Entre los ingleses se puede destacar, además de Darwin, a Joseph Dalton Hooker, director que fue de los Reales Jardines Botánicos de Kew, y a su ayudante, William Thiselton-Dyer, quien sucedió a Hooker al frente de dicha institución. En Alemania se puede mencionar a Karl I. E. von Goebel, notable morfólogo y anatomólogo, y a C. A. Fenner. En los Estados Unidos, F. E. Lloyd contribuyó más tarde con observaciones muy detalladas, especialmente sobre la trampa de las *Utricularia* y su mecanismo de disparo. Lloyd publicó, en 1942, un estudio que se haría clásico, *The Carnivorous Plants;* todavía hoy en día es ampliamente utilizado.

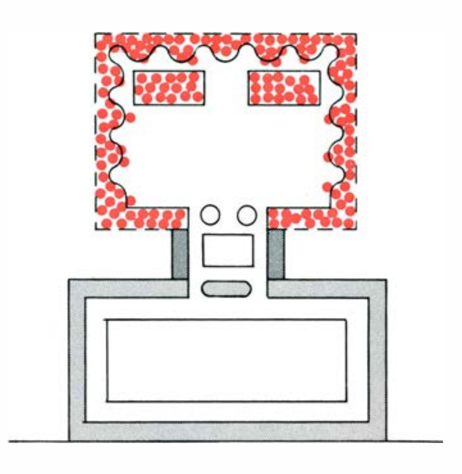
Poco puede añadirse al trabajo, notablemente preciso, de estos primeros observadores antes del descubrimiento de la microscopía electrónica. El microscopio electrónico de transmisión ha revelado muchas características de la estructura subcelular relacionadas con los procesos de secreción y absorción de las plantas carnívoras; en la última década, el microscopio electrónico de barrido ha logrado poner al descubierto más finos detalles de las trampas y de las glándulas asociadas.

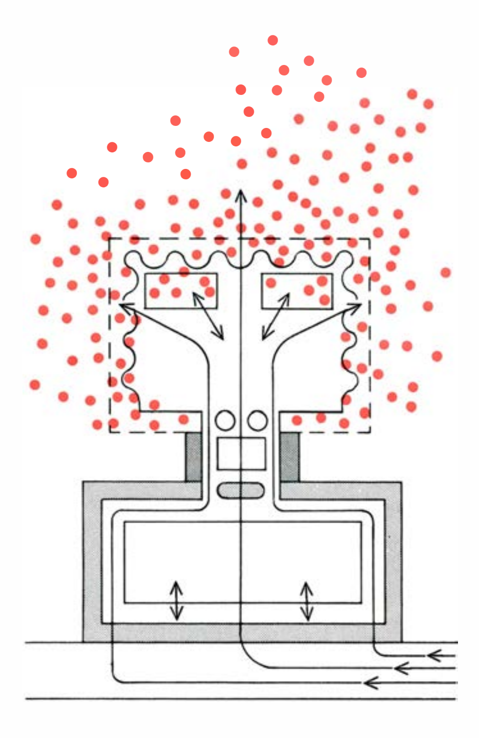
Las trampas de los distintos tipos de plantas carnívoras tienen diferentes clases de glándulas superficiales. Unas están relacionadas con la captura y digestión, otras con funciones distintas. Algunas glándulas producen néctar como atractivo para las presas, la mayoría de ellas parecidas a las glándulas nectaríferas de las flores que atraen insectos polinizantes. En *Nepenthes*, estas glándulas rodean el borde del jarro. En *Sarracenia*, glándulas de este tipo pueden formar un rastro "guía de hormigas" en la superficie externa de la trampa.

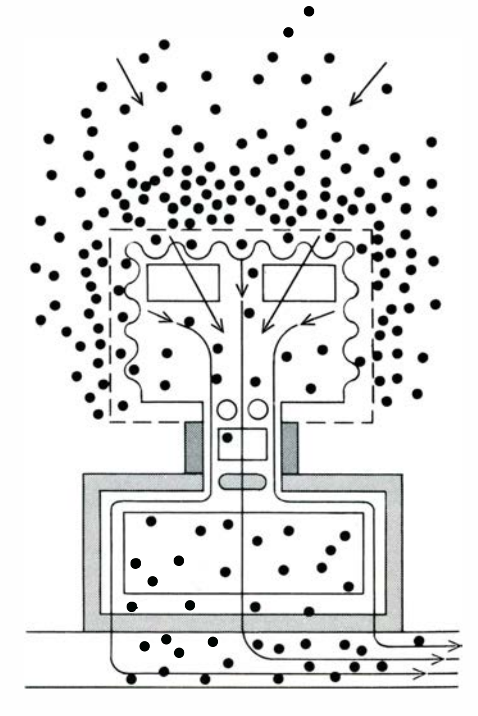
En *Pinguicula*, las glándulas que segregan los glóbulos viscosos del "papel atrapamoscas" de la superficie foliar están especializadas exclusivamente en esta función. En *Drosera*, sin embargo, las glándulas no sólo segregan el adhesivo sino también los enzimas que digieren la presa capturada. Las *Drosera* poseen, asimismo, gran número de pequeñas glándulas sin pedúnculo, visibles al microscopio. Estas glándulas están esparcidas por la superficie superior de la hoja y en los pedúnculos de las glándulas mayores. Se desconoce la función de las glándulas no pedunculadas, si bien parece posible que estén relacionadas con el movimiento de las glándulas pedunculadas. Estas, a las que los primeros investigadores mencionaron como "tentáculos", se mueven en dirección a la presa cuando son estimuladas. El movimiento resulta de la pérdida de turgencia en grupos de células a lo largo del pedúnculo que está afectado por el estímulo. Las glándulas no pedunculadas pueden ser responsables de la recolección del fluido que causa la pérdida de turgencia.

Glándulas de tipo similar pueden servir para la misma función en las *Pinguicula,* cuando la hoja se arrolla para cerrarse y capturar al insecto, formando lo que Darwin llamó estómago temporal. P. H. Sydenham y G. P. Findlay, de la Flinders University de Australia, han aportado pruebas recientes de la existencia de ciertas glándulas de *Utricularia* que realizan este tipo de función. Las glándulas involucradas se hallan en la periferia de las vejigas, y Sydenham y Findlay han demostrado que están relacionadas con el transporte activo de iones desde el interior de las cavidades de las trampas hasta el agua del medio externo. Mediante la formación de un gradiente osmótico, el movimiento iónico genera un flujo de agua del interior al exterior de la vejiga. Un flujo tal hacia el exterior es necesario para preparar la planta. En el género afín *Genlisea* la presa se mueve a lo largo de lo que constituye virtualmente un tracto digestivo, en cuya parte externa existen glándulas similares a las que se encuentran en la vejiga de *Utricularia.* Aquí, probablemente, funcionan para generar un flujo de fluido a través del tracto.

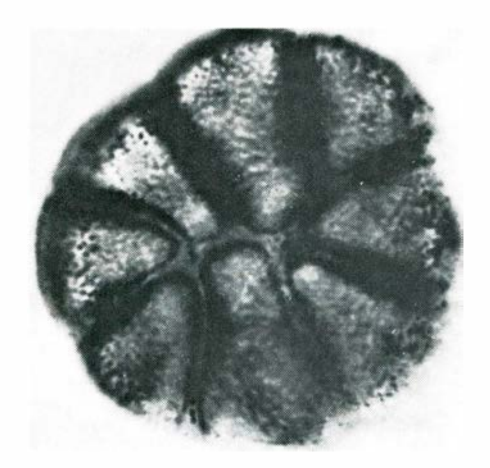
Las glándulas digestivas de las plantas carnívoras funcionan, bajo diferentes condiciones en los distintos géneros, de acuerdo con la naturaleza del mecanismo de captura. En *Nepenthes,* las glándulas

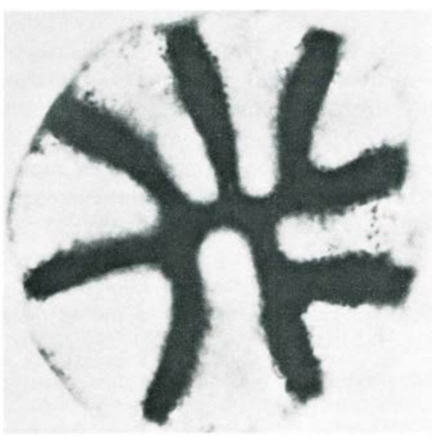






SECUENCIA DIGESTIVA, esquematizada a partir de estudios de la autora sobre *Pinguicula*. Arriba, la glándula digestiva en fase de acumulación. Los puntos coloreados en las vacuolas rectangulares superiores y en las invaginaciones de algunas de las paredes celulares representan los enzimas digestivos almacenados. En el centro, los estímulos de la captura de la presa inducen un flujo de fluido hacia el exterior, accionado osmóticamente. Este flujo arrastra hacia el exterior los enzimas digestivos, que alcanzan la superficie de la hoja a través de discontinuidades en la cutícula, capa impermeable que recubre la pared celular. Abajo, finalizada la digestión, se absorbe el acervo de secreción de la superficie de la hoja y los productos de digestión *(puntos negros)* son transportados a través de la pared celular; éstos se distribuyen luego al resto de los órganos de la planta mediante el sistema vascular del vegetal en cuestión.





ZONAS DE ALMACENAMIENTO DE ENZIMAS en la glándula digestiva de *Pinguicula* puestas de manifiesto en dos fotografías con diferentes planos focales. La actividad del enzima ribonucleasa se ha hecho visible gracias a una reacción química que produce una sustancia oscura. A la izquierda, se ha situado el foco del microscopio óptico en la superficie de las células de la cabeza de la glándula; los granos obscuros del producto de reacción muestran que el enzima se halla en la superficie de las ocho células de la cabeza de la glándula. A la derecha, el nivel del foco se ha situado en el centro de la glándula. La mayoría de los gránulos están asociados con las paredes celulares.

del tercio inferior del jarro están totalmente inmersas en su propia secreción líquida cuando la trampa madura y antes de capturar presa alguna. En las especies mayores, la acumulación de fluido puede ser de hasta un litro. En los cuatro géneros restantes de plantas jarro, se recolectan cantidades menores de fluido que, en algunos casos, bañan escasamente las glándulas, aunque también aquí parece que no es necesaria la presencia de la presa para estimular la secreción.

Por el contrario, las glándulas digestivas de *Dionaea muscipula* permanecen secas hasta que se captura la presa. Si se estimula la trampa con un lápiz o una varilla de vidrio, las glándulas digestivas permanecen secas y la hoja se vuelve a abrir rápidamente. Sin embargo, cuando es un insecto el atrapado, las glándulas se activan y fluye una secreción de entre los lóbulos cerrados de la hoja. Evidentemente, el inicio de la secreción depende más de un estímulo químico que de un estímulo mecánico. A pesar de que las glándulas de las vejigas de *Utricularia* están permanentemente inmersas en agua, parece que no segregan enzimas hasta que no son estimuladas por la presa.

En las *Drosera* las cosas no ocurren así. Aquí, las gotas de secreción viscosa se acumulan en la cabeza de cada glándula a medida que la hoja madura; la carga queda preparada hasta que una presa estimula la glándula y entonces se libera más secreción. Las *Pinguicula y Drosophyllum*, en algunos aspectos, combinan las características de la trampa de *Dionaea* y de *Drosera*. En estos géneros existen dos clases de glándulas en la superficie foliar: glándulas pedunculadas que vierten gotas de secreción al llegar a la madurez y que están relacionadas con la captura de la presa, y otras, sin pedúnculo, que permanecen secas hasta su estimulación, momento en que de su poro emana una secreción viscosa que contiene los enzimas digestivos.

En los trabajos de Darwin con *Drosera* y *Pinguicula,* se demuestra que la secreción puede venir estimulada por diversas fuentes de nitrógeno combinado, pero no por azúcar o carbonato sódico. Los insectos excretan muchos productos nitrogenados. No obstante, Richard Robbins, de la Universidad de Oxford, que estudió la especie *Dionaea muscipula*, ha sugerido recientemente que el estimulante principal puede ser el ácido úrico, presente en grandes cantidades en las excretas de todos los insectos. Las glándulas digestivas de los géneros de carnívoras varían considerablemente en su morfología. En el género *Nepenthe*s de plantas jarro, las glándulas tienen unas sesenta micras de diámetro y se hallan parcialmente hundidas en el interior de la epidermis del jarro, en donde están protegidas por un velo externo de tejido. En *Drosera,* las cabezas de las glándulas digestivas nacen de pedúnculos multicelulares. Las glándulas de las *Pinguicula,* tanto las pedunculadas especializadas en la captura de insectos como las sésiles relacionadas con la digestión, son menores y constan de muchas menos células que las glándulas de otros géneros.

A pesar de estas variaciones estructurales puede esbozarse una arquitectura común en todas las glándulas digestivas. En efecto, esta arquitectura semeja la de otras muchas clases de glándulas de la superficie vegetal. En todos los casos las células secretoras forman una cúpula externa o capa, de una o pocas células de espesor, que se une directamente a una célula especializada o a un pavimento hecho con varias células íntimamente unidas. Esta segunda capa está en contacto directo con los vasos conductores del tejido vascular o está separada del mismo por dos o tres grandes células de almacenamiento o "reservorio".

MOVIMIENTO DE LAS SUSTANCIAS DIGERIDAS desde la superficie de la hoja hacia el interior, trazado en esta autorradiografía de la hoja de *Pinguicula.* Se situó en la superficie de la hoja, a un lado de la zona central, una pequeña cantidad de proteína marcada con el isótopo radiactivo 14 del carbono. Ocho horas más tarde, la radiactividad de los productos de digestión (aminoácidos y péptidos) se han esparcido por gran parte de la superficie foliar *(zonas brillantes).* El movimiento de los productos en el sistema vascular de las hojas, principalmente hacia el tallo, pero también hacia el borde foliar y hacia el ápice, queda indicado por las delgadas líneas brillantes.

Las células secretoras externas de la glándula son células epidérmicas especializadas en la función de síntesis enzimática y muestran muchas características similares a las que se encuentran en células animales con funciones parecidas. La trama de membranas citoplasmáticas, conocida como retículo endoplasmático, está muy desarrollada; y algunas veces los elementos están estratificados, como sucede en las células del páncreas animal. El retículo endoplasmático se halla a veces asociado con plastos incoloros. Los plastos son un tipo de orgánulos que no se encuentran en células animales; el ejemplo más familiar de los mismos lo suministran los cloroplastos verdes del aparato fotosintético. En las células secretoras los cloroplastos pueden estar relacionados de algún modo con la síntesis de proteínas, pero no hay pruebas que lo confirmen con seguridad.

Las células secretoras de las plantas carnívoras recuerdan las de los animales en otros muchos rasgos. Las vacuolas de las células secretoras, formadas como vesículas hinchadas del retículo endoplasmático, son zonas de almacenamiento de enzimas; por tanto, pueden compararse con los lisosomas de las células animales. Además, en ciertas ocasiones, los núcleos de las células secretoras de la cabeza de la glándula contienen más ADN que la mayoría del resto de las células. Esta es una característica de ciertas glándulas añimales, por ejemplo, de las glándulas salivares de la mosca del vinagre. Por último, se puede observar un paralelismo en el enorme desarrollo del aparato de Golgi en las glándulas relacionadas con la secreción de mucílago en las hojas de *Drosera y Pinguicula.* Muchos tipos de glándulas animales muestran un desarrollo similar de este sistema citoplasmático, que está relacionado con el empaquetamiento de los diversos productos sintéticos y su transporte al exterior de la célula.

Las células de las glándulas animales tienen una membrana externa, pero no poseen una pared celular del tipo de la que se encuentra en las plantas; muchas de las adaptaciones de las células glandulares de las plantas carnívoras son únicas, toda vez que están relacionadas con la estructura y función de la pared celular. La pared externa de las células secretoras se halla recubierta por una capa de cutina impermeable; aunque esta capa está perforada por distintos poros o discontinuidades menos definidas de la propia pared, a través de las cuales las secreciones pueden alcanzar la superficie externa de la célula. Las paredes mismas, muchas veces, se encuentran modificadas para el almacenamiento y transferencia de los productos de secreción. Algunas están engrosadas irregular-

FAMILIA Y GENERO	NUMERO DE ESPECIES	DISTRIBUCION	TRAMPA: ACTIVA		TRAMPA: PASIVA		ENZIMAS DIGESTIVOS										
			SUCCION	RESORTE	EMBUDO	ADHESIVO	PEROXIDASA	RIBONUCLEASA	LIPASA	ESTERASA	FOSFATASA ACIDA	AMILASA	MALTASA	INVERTASA	QUITINASA	PROTEASA	UREASA
NEPENTHACEAE																	
NEPENTHES	60 ESPECIES	BORNEO Y LIMITROFES			X		?	+	+	+	+	–			?	+	
SARRACENIACEAE																	
SARRACENIA	9 ESPECIES	AMERICA DEL NORTE			X				?	–		?	–	+		+	–
HELIAMPHORA	4 ESPECIES	AMERICA DEL SUR NORORIENTAL			X												
DARLINGTONIA	1 ESPECIE	CALIFORNIA, OREGON			X				–			?	–	?		+	–
CEPHALOTUS	1 ESPECIE	AUSTRALIA SUDOCCIDENTAL			X							–				+	
DROSERACEAE																	
DROSERA	90 ESPECIES	COSMOPOLITA				X	+		–	+	+	–				+	
DROSOPHYLLUM	1 ESPECIE	MEDITERRANEO OCCIDENTAL				X	+			+	+	–				+	
DIONAEA	1 ESPECIE	CAROLINA DEL NORTE Y DEL SUR		X						+	+					+	
ALDROVANDA	1 ESPECIE	EUROPA, AFRICA Y ASIA		X						+	+					+	
LENTIBULARIACEAE																	
PINGUICULA	30 ESPECIES	HEMISFERIO NORTE				X	–	+		+	+	+			–	+	
GENLISEA	15 ESPECIES	AMERICA DEL SUR	X							+	+					+	
UTRICULARIA, BIOVULARIA, POLYPOMPHOLYX	150 ESPECIES	COSMOPOLITA	X							+	+					+	
BYBLIDACEAE																	
BYBLIS	1 ESPECIE	AUSTRALIA				X											

LA ACCION DE CAPTURA de 13 géneros de plantas carnívoras, pertenecientes a cinco familias vegetales, se indica en la tabla mediante una *X*. A la derecha, se muestra la presencia (+) o ausencia (–) de 11 enzimas digestivos en el líquido digestivo de cada género. El signo de interrogación significa que el enzima puede estar presente; un espacio en blanco, que no existe información hasta ahora. El género *Utricularia* se divide a veces en tres géneros, según la forma de las flores, si bien el mecanismo de captura de la planta es el mismo en todos ellos.

mente, formando extensos repliegues o ramificaciones laberínticas; la membrana celular sigue estas circunvoluciones, de suerte que la interfase entre la pared celular y el citoplasma posee una superficie netamente incrementada. Por ejemplo, en *Pinguicula,* la interfase puede estar ampliada por lo menos en un orden de magnitud. En las células secretoras de mucílago de las glándulas de *Pinguicula* y *Drosera,* los productos precursores se acumulan en las vesículas del aparato de Golgi y se descargan al exterior por fusión con la membrana celular, de donde pasan a través de la pared celular y se depositan en su cara externa. De la intensidad de esta actividad nos habla el hecho de que las glándulas secretan varias veces su propio volumen de mucílago a lo largo de su vida activa.

Las glándulas digestivas secretan enzimas por otros métodos. En algunos casos, los enzimas parecen difundirse directamente a través del plasmalema, la membrana externa del citoplasma. En otros, como en las glándulas de *Drosera*, la transferencia involucra una disrupción local del plasmalema durante el período de secreción rápida que sigue a la captura de una presa.

Las células de la capa situada bajo las células secretoras muestran algunas de las características de la capa endodérmica de la raíz, que es una vaina celular que separa la corteza radical de los tejidos conductores internos. Las paredes laterales de las células están muy cutinizadas y en ellas el plasmalema se encuentra en íntimo contacto con la pared celular. El agua no puede pasar a través de las paredes laterales, por lo que se ve obligada a desplazarse a través del citoplasma.

Como las glándulas de los distintos géneros de plantas carnívoras funcionan bajo circunstancias ampliamente distantes, debe esperarse, por consiguiente, que los procesos de secreción y resorción varíen de un modo concordante. Mis propias observaciones de las especies del tipo "atrapamoscas", como *Pinguicula* y *Drosera,* sugieren que estas plantas tienen mecanismos secretores y absorbentes bastante distintos de los que parecen operar en las plantas jarro. Entre las *Pinguicula,* algunos enzimas, sobre todo amilasas, son segregados por glándulas pedunculadas cuyo exudado captura al insecto presa; pero son las glándulas no pedunculadas de la superficie las que proporcionan el flujo principal del líquido digestivo. Antes de la estimulación, las glándulas no pedunculadas retienen en reserva un acervo de proteasas, nucleasas, fosfatasas, esterasas y otros enzimas digestivos, almacenados en paredes celulares esponjosas y en las vacuolas de las celulas secretoras. El estímulo induce una salida de fluido y éste arrastra los enzimas almacenados hacia fuera, sobre la superficie de la hoja.

Se puede seguir la actividad de los enzimas que aparecen en el acervo de secreción de la superficie de la hoja. La secreción se extiende y profundiza para rodear la presa y, después, cuando la digestión ha terminado, el fluido se resorbe. En términos generales, la magnitud de la secreción está relacionada con el tamaño de la presa. Una captura de un pequeño insecto induce solamente un flujo modesto de líquido digestivo y, en *Pinguicula,* tras una captura así, la secreción alcanza la magnitud máxima aproximadamente en una hora. Un insecto grande puede estimular una secreción de tal magnitud que el líquido llegue a gotear por el borde de la hoja. Bajo estas circunstancias, la secreción puede continuar durante horas y su volumen puede exceder el volumen total de líquido que inicialmente se encontraba en la hoja, demostrando que el flujo se suplementa por el paso de agua de otras zonas de la planta a través del xilema vascular. Las hojas sobrestimuladas no completan el ciclo digestivo. No tiene lugar la resorción y la hoja empieza a pudrirse, víctima, por decirlo de algún modo, de una "indigestión".

Si el ciclo digestivo es normal, el período de resorción resulta solamente un poco más prolongado que el período de flujo inicial. Knox y yo mismo encontramos en nuestros experimentos con trazadores que los productos finales marcados de la digestión de proteínas de algas pasan del acervo de secreción a las hojas de *Pinguicula,* a través de las mismas glándulas que han suministrado el líquido digestivo. Las paredes esponjosas de las glándulas, en las que se acumularon los enzimas digestivos, actúan entonces de canales para el paso hacia el interior. Los productos de digestión pasan luego, a través de las células endodérmicas, al sistema vascular de la hoja, detectándose por autorradiografía en los vasos del xilema.

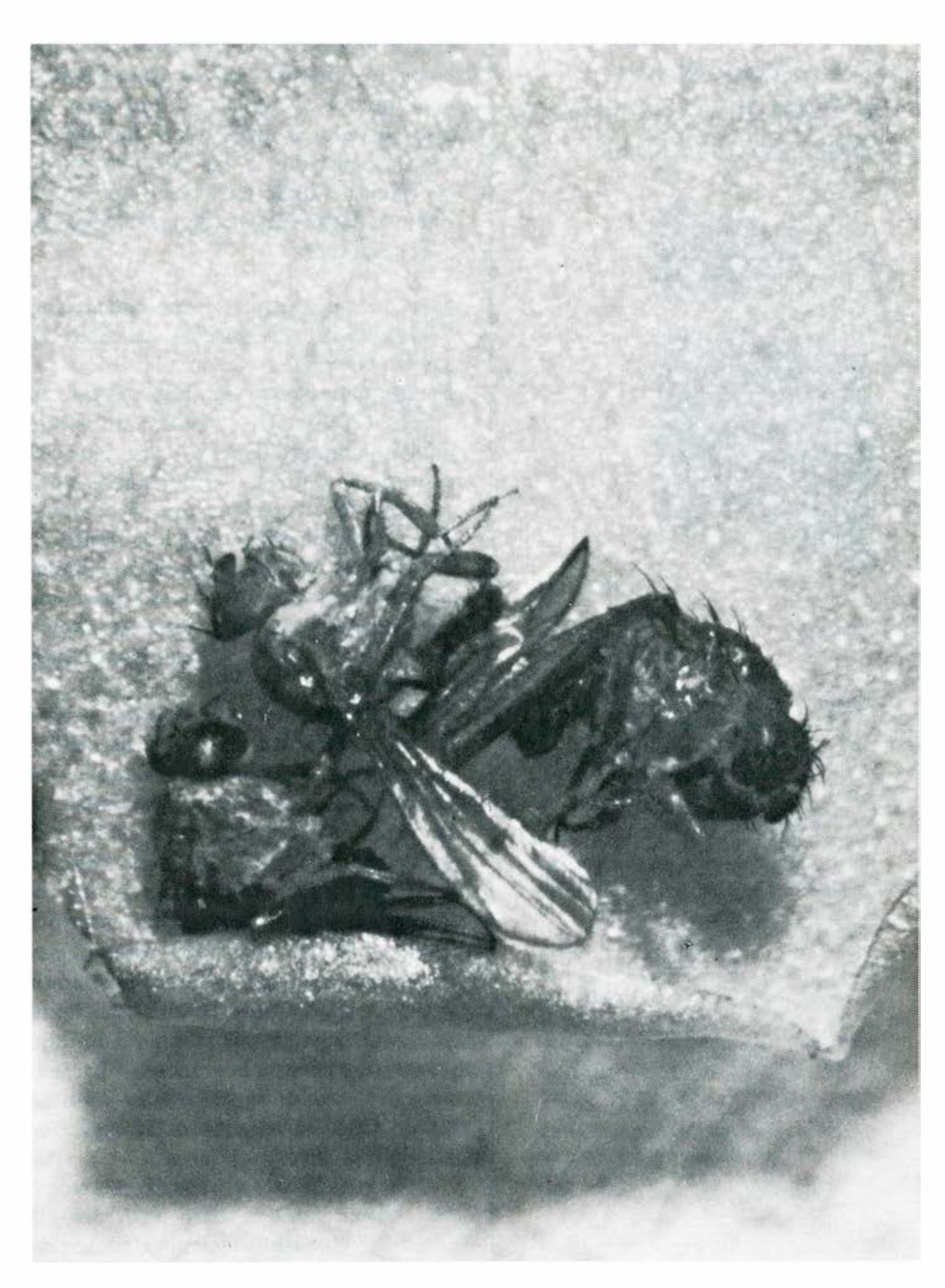
En otros ensayos añadimos una sustancia marcadora, nitrato de lantano coloidal, al acervo de secreciones de las hojas de *Pinguicula,* en el momento en que empezaba la resorción. El marcador es opaco al microscopio electrónico. Como en los ensayos con trazadores radiacti-

vos, la sustancia penetra en las células glandulares a través de discontinuidades de la capa de cutina de las paredes celulares y se mueve hacia las células endodérmicas.

Los protoplastos de las células glandulares de *Pinguicula* muestran cambios patentes durante el proceso de digestión. En la mitad secretora del ciclo, las vacuolas se encogen y se hacen poco definidas. Al mismo tiempo, el plasmalema que, normalmente, está en contacto continuo con la sinuosa superficie interna de la pared celular, pierde este contacto. Cuando la glándula entra en la fase de resorción del ciclo, el citoplasma se condensa, el núcleo de la célula se ramifica y las invaginaciones laberínticas de las paredes celulares se difuminan, posiblemente por disolución parcial de la estructura de pared.

En un detallado estudio de microscopía electrónica de la acción de las glándulas de *Dionaea muscipula* durante el ciclo digestivo, D. Schwab, E. Simmons y James Scala, del Owens-Illinois Corporate Technology Technical Center de Toledo, Ohio, encontraron cambios relacionados con la estructura fina de las paredes celulares. En la mitad secretora del ciclo, las invaginaciones de la pared celular empiezan a erosionarse y el plasmalema alcanza un perfil más liso. En *Pinguicula,* donde cada glándula funciona una sola vez, los cambios son irreversibles. En *Dionaea muscipula,* sin embargo, las paredes de las células secretoras pueden ser reconstruidas y las células pueden volver a su estado primitivo antes de que la hoja torne a abrirse para capturar una nueva presa.

En *Pinguicula* y, probablemente, en otros géneros de plantas carnívoras con el mismo modelo de función de las glándulas digestivas, se ha desarrollado un ciclo digestivo definido. Las fases de secreción y resorción, asociadas respectivamente a movimientos masivos de fluido, primero hacia fuera y luego hacia dentro, a través de cada glándula, están engranadas con cambios de mayor amplitud en las células glandulares. Ello no parece presentarse en el ciclo de las plantas jarro. En este grupo, al primer período de secreción sigue un intervalo prolongado en el que el jarro mantiene más o menos constante su nivel de líquido. Los insectos atrapados se acumulan en el fluido y los productos de digestión son conducidos continuamente desde la trampa a los órganos principales de la planta. Mediante una serie de ingeniosos experimentos, Ulrich-Lüttge, de la Escuela de Tecnología de Darmstadt en Alemania Occidental, demostró que las mismas glándulas responsables de la secreción del líquido enzimático participaban también en la captura de los productos de digestión. El proceso es esencialmente el mismo que en las *Pinguicula* excepto en que la resorción no se lleva a cabo a través de la absorción de todo el fluido, sino mediante un transporte selectivo, hacia el interior, de moléculas e iones específicos.



ESTOMAGO TEMPORAL, que diría Charles Darwin, de *Pinguicula,* desenrollándose tras la digestión de tres moscas de la fruta atrapadas. No se encuentran enzimas, que puedan digerir el exosqueleto quitinoso de los insectos, en el fluido digestivo de las glándulas de *Pinguicula.* Ocurre así que los cuerpos de las moscas aparecen como cáscaras vacías tras la ingestión de sus tejidos internos.

Lüttge halló que las tasas de captura diferían según la sustancia involucrada. Por ejemplo, el aminoácido alanina se movía dentro de la glándula a una velocidad mayor que los iones fosfato, y éstos, a su vez, eran transportados a mayor velocidad que los iones sulfato. Para explicar estas tasas diferentes, es necesario considerar la participación, en la captura, de "bombas" de distinta especificidad. Las bombas podrían regirse por procesos metabólicos de la planta, suposición que se basa en que la transferencia se paraliza parcialmente cuando se añaden inhibidores metabólicos. No se conoce la localización exacta de estas bombas, pero es significativo que las grandes glándulas digestivas del jarro de *Nepenthes* posean el equivalente de la capa endodérmica. Habida cuenta del

grosor de las paredes laterales de las células, los líquidos deben transportarse aquí por el protoplasma. Los sistemas transportadores metabólicos pueden estar incorporados a las membranas de las células endodérmicas, si es que no lo están en la membrana de las mismas células secretoras.

No puede explicarse cómodamente, en *Pinguicula,* los sucesos del ciclo digestivo en términos de bombeo selectivo. El sistema involucra un flujo en masa en ambos sentidos. He sugerido que el flujo inicial de líquido digestivo que sigue a la captura de la presa es conducido osmóticamente. Si se supone que el estímulo de la captura induce una lisis rápida de los polisacáridos de la pared, ésta podría ser la fuente de azúcares solubles que promoverían una transferencia rápida de líquidos en las células glandulares por ósmosis.

Al principio, este flujo podría atravesar las membranas intactas de las células endodérmicas, obteniéndose el agua, primero de los reservorios adyacentes de las células y, luego, a través de los elementos vasculares continuos, del resto de la planta. Podría entonces darse una reversión al final de la fase de secreción, por pérdida del control ante alteraciones irreversibles de las células endodérmicas. La resorción de la superficie de la hoja podría explicarse mediante un flujo inverso a través de la glándula y hacia el sistema vascular, en respuesta a gradientes de difusión instaurados en algún lugar de la planta.

El mecanismo de captura propuesto por Lüttge para el jarro de *Nepenthe*s es similar al mecanismo considerado responsable de la captura normal de los minerales del suelo por parte de las raíces de las plantas. Es como si cada jarro de la planta creara su propia solución de suelo enriquecido y absorbiera de ella los minerales que necesitara. La analogía parece mucho más fuerte si se considera que, tras haberse abierto el jarro durante cierto tiempo, su líquido empieza a infectarse con flora de tipo comensal, principalmente de bacterias, que muy pronto asumen el grueso de la digestión de la presa capturada.

En este estadio, el líquido del jarro se ha hecho alcalino y maloliente. Los enzimas vegetales pueden representar entonces un pequeño papel en el proceso digestivo; las glándulas digestivas actúan principalmente como órganos de absorción, tomando y concentrando selectivamente los productos útiles. Por llevar la analogía aún más lejos, cabe el que las plantas jarro enraizadas en el suelo puedan beneficiarse, al principio de cada estación de crecimiento, de un enriquecimiento local y temporal del suelo por nutrientes liberados a partir de los restos de los jarros muertos de la estación precedente y de su contenido parcialmente digerido. Así, los productos útiles de la depredación podrían obtenerse del modo normal en la planta; a través de las raíces más que por las hojas.

Parece claro que el suplemento de nutrientes disponibles para las plantas carnívoras les confiere ventajas específicas particularmente en ambientes en los que son escasos ciertos tipos de nutrientes. Se ha supuesto comúnmente que el principal beneficio de la captura y digestión de presas animales por parte de una planta es el suministro complementario de nitrógeno. Las investigaciones actuales indican, sin embargo, que el fósforo aportado es igualmente importante e incluso, en determinadas circunstancias, lo es aún más. La presencia de nucleasas y fosfatasas en las secreciones de las glándulas digestivas puede relacionarse con este requerimiento. En hábitat en los que el crecimiento de la planta está limitado por deficiencias de macronutrientes, como el fósforo –o de uno o más de los demás elementos requeridos solamente en cantidades de traza– las ventajas de obtenerlos a partir de presas animales puede ser substancial.

Son pues, muchas, las ventajas de la capacidad carnívora. Ahora bien, ¿equilibran el coste? La mayoría de las plantas viven en circunstancias competitivas. ¿Es eficaz el gasto energético de las plantas carnívoras para la síntesis de enzimas digestivos y otros productos de secreción, sin mencionar el gasto producido en la elaboración de las adaptaciones estructurales? La conclusión de esta línea de razonamiento es simplemente que apenas si importa cualquier balance energético. En casi todos los casos, las plantas carnívoras se encuentran en zonas donde la abundancia de luz solar, las fuentes adecuadas de carbono y el acceso sin cortapisas al agua durante el período de crecimiento no limitan la fotosíntesis, que es la fuente energética primaria de la planta. Así, el coste de la captura de un átomo de nitrógeno, de fósforo o de cualquier elemento que pueda ser el principal factor limitante del crecimiento no es significativo. Si la captura de estos nutrientes vitales aumenta la capacidad de supervivencia del vegetal en lugares donde puede introducirse un competidor no carnívoro, queda demostrado que, sea cual sea el coste energético, el gasto está justificado.

La genética del cáncer humano

Un nuevo enfoque experimental hace posible identificar, en ciertos casos, el cromosoma humano específico involucrado en la transformación de una célula normal en una célula tumoral

Carlo M. Croce e Hilary Koprowski

La evolución del punto de vista moderno del cáncer, que lo entiende como una enfermedad que se desarrolla a partir de la transformación del material genético de una o varias células tisulares normales del cuerpo y que resulta en la proliferación incontrolada de las células descendientes, se remonta, en parte, a los primeros estudios teóricos del zoólogo alemán Theodor Boveri. Este había formulado, en 1914, su hipótesis "de la mutación somática" sobre el origen del cáncer. De acuerdo con la teoría de Boveri, que de una forma modificada es ampliamente aceptada en la actualidad por los oncólogos, la célula primordial de un crecimiento maligno es una célula somática (cualquier célula no germinal), la cual, "como resultado de un proceso anormal, contiene un determinado y erróneamente combinado complejo cromosómico". Aludía, por supuesto, a la disposición de los cuerpos bastonados en cuyo seno el material genético se encuentra ordenado durante parte del ciclo vital de la célula. Y añadía: "Tal es, por encima de todo, la causa de la tendencia a la rápida proliferación celular, la cual se transmite a todas las células descendientes de la célula primordial".

Boveri, que también reconocía la importancia de ciertos factores ambientales, como los carcinógenos químicos y radiaciones ionizantes, en su calidad de agentes desencadenantes de la transformación maligna, llegó a especular sobre la identidad de los supuestos cromosomas del cáncer. "Cabe, escribía, el que para un determinado tipo celular exista solamente una simple combinación cromosómica anormal que da a la célula la cualidad de maligna".

A lo largo de las dos últimas décadas, y gracias al advenimiento de bastantes y poderosas nuevas técnicas de laboratorio, se ha hecho posible la detección de cambios cromosómicos, no producidos al azar, asociados a diversos tipos de cáncer humano. No obstante, más recientemente se ha desarrollado un nuevo método para identificar lo que Boveri denominó "la simple combinación cromosómica anormal", responsable de la "cualidad de malignidad" de las células transformadas. La principal técnica, en la que se mueven todos los nuevos enfoques, consiste en la fusión o hibridación de células somáticas humanas transformadas con células de otros animales. Aquí describiremos cómo los citólogos actuales, entre los que incluimos nuestro propio grupo de Wistar Institute of Anatomy and Biology, de Filadelfia, recurrieron a tales, y otras, técnicas en el seguimiento de la línea de investigación comenzada por Boveri hace más de sesenta años.

¿Puede heredarse una predisposición al cáncer? Hoy se da por sentado que hay varios tipos de cáncer que son realmente hereditarios; para afirmar lo cual se parte de los estudios sobre la distribución de la incidencia de los mismos, por familias, en una población dada. Así, por ejemplo, es posible demostrar una predisposición hereditaria en varios tipos de cáncer, relativamente poco frecuentes, que se originan en el embrión humano y que aparecen durante la primera o segunda infancia. Uno de tales tumores hereditarios, el retinoblastoma, se ha estudiado con más intensidad que cualquier otro. El retinoblastoma es una enfermedad que afecta a la retina de ambos ojos (bilateral) o de un solo ojo (unilateral). Suele detectarse al observar que la visión del niño empeora durante los primeros años de la vida. La enfermedad aparece con una frecuencia de uno por cada 25.000 niños, y representa casi el 1 por ciento de las causas de muerte por cáncer en la infancia y el 5 por ciento de los casos de ceguera de los niños. Todos los retinoblastomas bilaterales y un pequeño porcentaje de los retinoblastomas unilaterales se transmiten dentro de las familias como un carácter autosómico dominante, o sea, como una enfermedad causada por la presencia de un simple gen dominante en uno de los autosomas (cromosomas no sexuales) de los padres. La otra manifestación de la enfermedad, el retinoblastoma unilateral esporádico, no parece que sea hereditaria. La poliposis del colon –enfermedad definida por la presencia de pequeños tumores benignos o pólipos en la pared del intestino– puede también heredarse como un carácter autosómico dominante.

Los individuos afectos de tumores heredados, tales como el retinoblastoma familiar o la poliposis del colon, manifiestan una predisposición a desarrollar tumores en otras partes del cuerpo. Por ejemplo, los pacientes con retinoblastoma familiar tienden a desarrollar tumores óseos y leucemia, tumores renales y tumores musculares, con una frecuencia mayor que otros individuos. Además, están más claramente predispuestos al desarrollo de tumores en zonas del cuerpo sometidas a terapia por radiación. Los tumores de hueso, cerebro y piel han sido hallados también en pacientes con poliposis del colon heredada con mayor frecuencia que en poblaciones normales.

El rasgo común que define a todas las células tumorales es su proliferación incontrolada. De alguna manera, las células tumorales escapan de las restricciones impuestas por el cuerpo sobre las células normales, que limitan su velocidad de multiplicación o el número de veces que pueden dividirse. Las células de ciertos tumores malignos tienden también a migrar más libremente a través de los tejidos vecinos que las células normales, infiltrando, por tanto, órganos distantes para dar lugar a metástasis, o tumores secundarios. La teoría de la mutación somática de Boveri, sobre el origen del cáncer, postula que cualquiera que sea la causa de un deter-

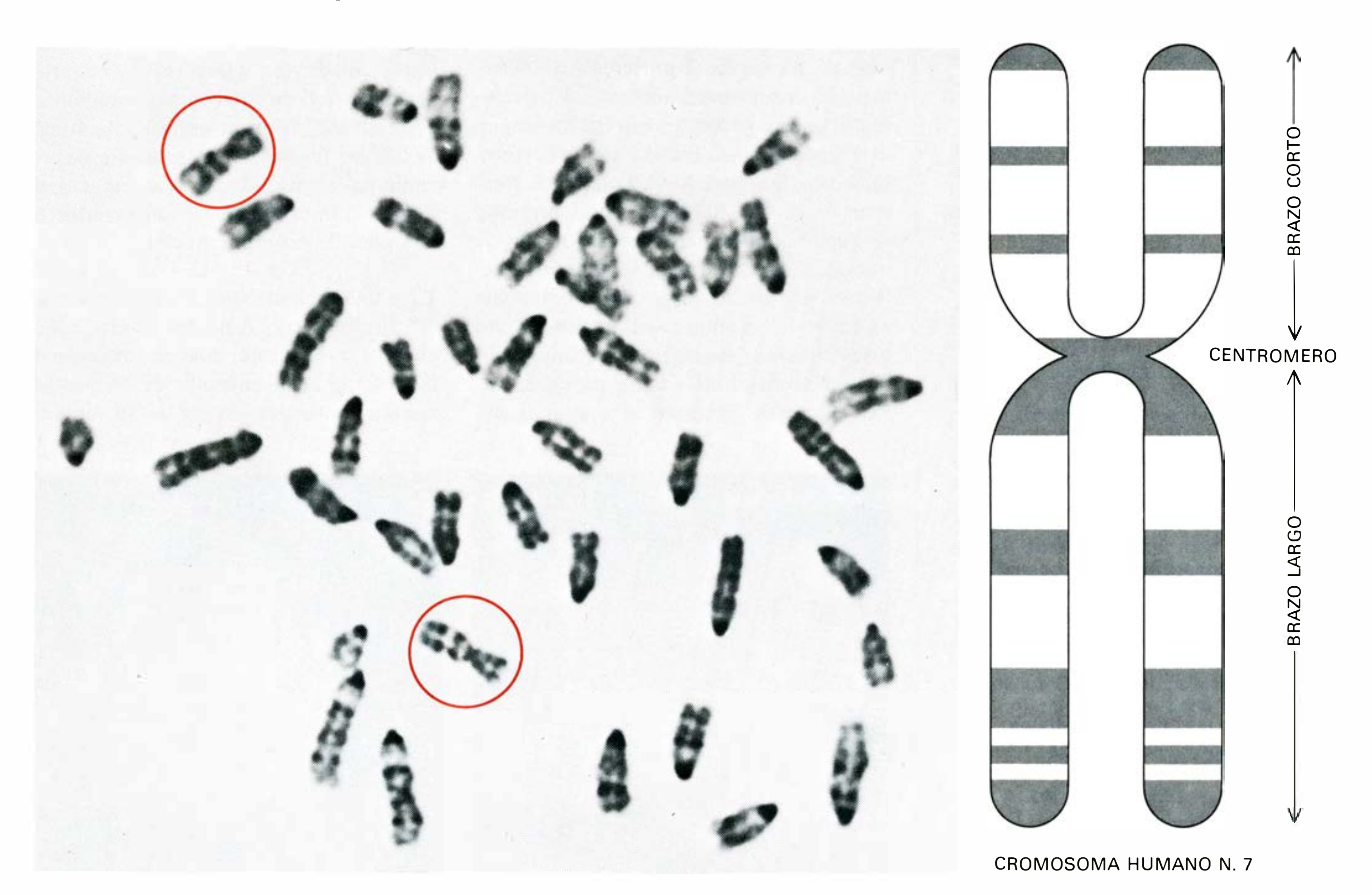
minado tumor –sean factores ambientales o predisposición hereditaria– el resultado es básicamente un cambio en el genoma (dotación completa de genes) de una célula de tejido normal que inicia la secuencia de etapas sucesivas que habrán de abocar en el desarrollo del tumor.

No obstante, si la herencia de los genes que codifican para el retinoblastoma y la poliposis del colon fuera solamente el acontecimiento responsable del desarrollo de estos tumores particulares, se esperaría que todas las células epiteliales de la retina y del colon fueran tumorigénicas. Y eso no es lo que se observa. Por el contrario, el número de células tumorales en los tejidos afectados suele ser bastante pequeño y la gran mayoría de las células permanecen normales.

Para explicar el desarrollo de tumores hereditarios de este tipo, Alfred F. Knudson Jr., de la Graduate School of Biomedical Sciences de la Universidad de Texas, sugirió en 1971 que debía existir un acontecimiento adicional desencadenante. De acuerdo con la hipótesis de Knudson, tales tumores resultarían exclusivamente si una segunda mutación afectara las células de la retina o las células del colon de individuos portadores de los genes para el retinoblastoma o para la poliposis. Si la mutación adicional (o mutaciones) tiene lugar en células de otros tejidos distintos de la retina o el colon, ello explicaría la aparición de estos tumores secundarios que se han observado en portadores de genes, ora espontáneamente, ora después de la irradiación.

En el caso del retinoblastoma familiar uno o más tumores del ojo aparecen típicamente a la edad de 14 meses, mientras que en el retinoblastoma unilateral esporádico –la forma no familiar de la enfermedad– el tumor simple no se descubre habitualmente hasta después de los 30 meses de edad. Considerada la disparidad del tiempo y la más baja frecuencia general del retinoblastoma espontáneo, Knudson propuso, con el requerimiento de dos mutaciones para la surgencia de este tumor, que éstas debían darse en la misma célula retiniana, la cual se convertiría en la progenie maligna. En el estado actual de nuestros conocimientos no se sabe si se precisan dos o más mutaciones para transformar una célula normal en otra célula tumoral en cualquier otro tipo de cáncer. La hipótesis de Boveri sobre el origen unicelular del cáncer ha sido puesta a prueba recientemente a partir del desarrollo de un nuevo enfoque experimental del problema, aportado por Philip J. Fialkow, del Veterans Administration Hospital en Seattle. Con la ayuda de una técnica basada en la capacidad de los tumores para producir una o ambas formas de un determinado enzima humano ligado al sexo, Fialkow ha podido demostrar que, aunque muchos tipos de tumores se originan en una simple célula primordial, otros son claramente de origen multicelular.

¿Cómo pueden identificarse los cromosomas del cáncer? Desde 1960, son varios los investigadores que han conseguido asociar cambios cromosómicos específicos con diferentes tipos de tu-



LOS CROMOSOMAS del cáncer humano se representan por medio de círculos coloreados en la fotomicrografía de la izquierda. Todos éstos cromosomas se obtuvieron a partir del núcleo de una célula híbrida formada por la fusión de una célula tumoral humana con una célula de ratón. La célula humana había sido transformada en célula maligna en el laboratorio por infección con el virus oncógeno SV 40 (simian virus 40). La célula híbrida contiene 40 cromosomas *(no encerrados en círculo)*, la dotación cromosómica completa de la célula parental del ratón. Los dos cromosomas humanos presentes (procedentes de una dotación normal de 46 cromosomas) pueden identificarse en base al patrón de distribución diferente de las bandas oscuras y claras, como el cromosoma humano número 7. El patrón de bandas se acentúa en fotomicrografía por adición en la preparación de un colorante especial. A la derecha se muestra un dibujo del cromosoma humano número 7. La presencia del cromosoma humano número 7 en células híbridas tumorigénicas de este tipo, junto con su ausencia en los híbridos no tumorigénicos, constituye una prueba importante en favor de que el cromosoma 7 sea el cromosoma humano que integra el material genético del virus SV (simian virus) 40, responsabilizándolo así de la transformación maligna de células humanas normales que se desarrollan en el cultivo.

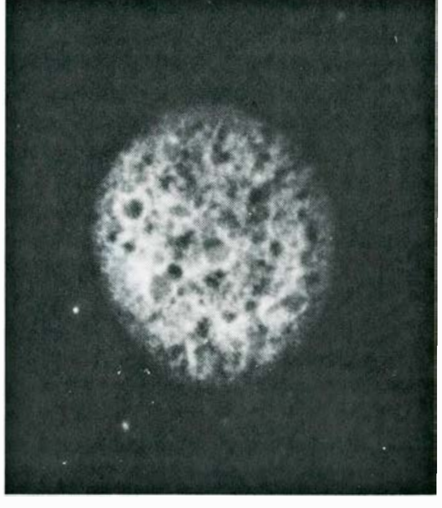
mores. Así, Peter C. Nowell y David A. Hungerford, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania, observaron aberraciones cromosómicas no realizadas al azar que se caracterizaban por la deleción de los "brazos" largos del cromosoma humano número 22, en leucocitos anormalmente proliferantes que procedían de pacientes con leucemia mielógena crónica. Janet Rowley, de la Universidad de Chicago, encontró posteriormente que, en este caso, el brazo largo del cromosoma número 22 se transfiere específicamente al cromosoma número 9. Se han registrado cambios cromosómicos no realizados al azar en otros tipos de leucemia, incluida la versión aguda de la leucemia mielógena. Más recientemente, Rowley ha hallado un doble cromosoma número 1 en 34 pacientes afectos de ciertas enfermedades sanguíneas: la leucemia aguda no-linfocítica y policitemia vera (una rara enfermedad que se distingue por la proliferación anormal de eritrocitos).

Además, J. Mark y sus colaboradores en la Universidad de Lund han descrito que células tumorales obtenidas de pacientes con meningiomas (tumores benignos del cerebro) presentan un extremo del cromosoma número 22 delecionado, que no parece transferirse a ningún otro cromosoma. En el caso del retinoblastoma familiar, K. P. Lele, L. S. Penrose y H. B. Stallard, del University College London, demostraron que la anomalía cromosómica involucra la deleción del brazo largo del cromosoma número 13. Aunque se han observado otras muchas aberraciones cromosómicas en células obtenidas a partir de varios tumores benignos y malignos del hombre, existen muchos casos en los que no se pueden encontrar pruebas de tales anomalías cromosómicas asociadas a un tumor. Por tanto, y en términos generales, no puede afirmarse si un cambio cromosómico específico ha de resultar invariablemente en un determinado tipo de neoplasia humana. Además, tumores inducidos en el laboratorio por medio de mutágenos físicos, químicos o virales, pueden resultar en cambios cromosómicos no morfológicamente observables. Es precisamente en estos casos en los que los nuevos métodos experimentales para la identificación de los cromosomas del cáncer humano han demostrado ser más valiosos.

El uso experimental de los virus para transformar células humanas normales en células cancerosas se evidenció por vez primera, hace más de 15 años, por uno de nosotros (Koprowski) en colaboración con un grupo de investigadores del Wistar Institute. En tal sistema biológico, el ADN del virus se integra de alguna manera en el ADN de la célula huésped, y la célula transformada puede propagarse indefinidamente en un cultivo de tejidos convencional. Las células hijas muestran cambios hereditarios permanentes: proliferan sin solución de continuidad, forman clones, o colonias de células idénticas, en un medio de crecimiento semisólido, y son capaces de inducir tumores tras ser inyectados en animales de experimentación.

En una reciente serie de experimentos, dirigidos con Anthony J. Girardi en el Wistar Institute, hemos utilizado la técnica de la hibridación de células somáticas para determinar si un virus de





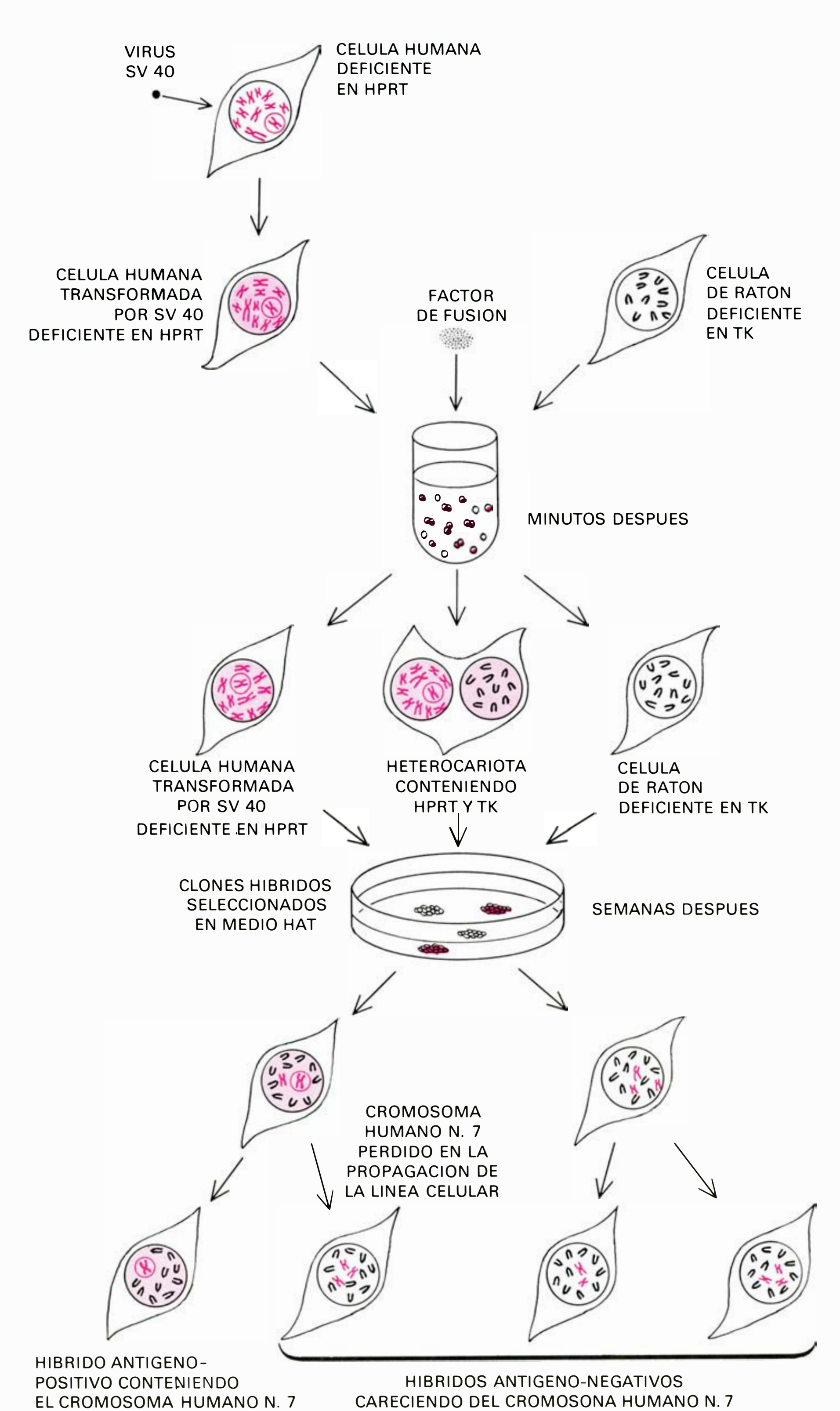
LA TRANSFORMACION MALIGNA de células humanas por el virus SV 40 resulta en la producción de un antígeno tumoral característico (conocido por los biólogos como antígeno *T*) dentro del núcleo de la célula transformada. La presencia de este antígeno puede detectarse por medio de un suero de anticuerpo fluorescente. En las microfotografías (que han sido obtenidas por los autores), las células transformadas o antígeno-positivas presentan un núcleo brillante *(a la derecha),* **en tanto que las no transformadas, o antígeno-negativas, tienen núcleos oscuros** *(a la izquierda).*

este tipo, inductor de tumores, se integra realmente en un cromosoma humano específico, y, por tanto, si el cromosoma así identificado es responsable de la transformación maligna de la célula.

Para nuestros propósitos, el rasgo más importante de la técnica de hibridación radica en que una gran parte de la dotación de los 46 cromosomas humanos (22 pares de autosomas y los dos cromosomas sexuales) se pierde típicamente en la célula híbrida formada por la fusión de células humanas con células de ratón. Así pues, estudiando repetidamente las características particulares de las células fusionadas, se puede determinar en principio si un cromosoma humano específico se mantiene o no en el híbrido.

En uno de los experimentos, empleamos la cepa vírica SV 40 ("simian virus" 40) para transformar células humanas obtenidas de un paciente afecto del síndrome de Lesch-Nyhan, una enfermedad ligada al sexo que se caracteriza por un déficit en el enzima hipoxantina-fosforribosil transferasa (HPRT). Las células con esta deficiencia enzimática particular se muestran incapaces de vivir en un medio de cultivo que contenga una mezcla de otras tres sustancias: hipoxantina, aminopterina y timidina (medio conocido por HAT). Sucede que las células de ratón deficitarias en el enzima timidina kinasa (TK) mueren también en el medio HAT. Sin embargo, los híbridos formados por la fusión de estos dos tipos de células pueden crecer en el medio HAT.

Después, eliminamos todas las células excepto las fusionadas por el paso a través de dicho medio selectivo; obtuvimos dos poblaciones diferentes de híbridos: una de ellas expresaba el antígeno tumoral característico asociado a la transformación del SV 40, las otras no lo expresaban *(véase la ilustración de esta misma página)*. Los clones híbridos antígeno-positivos (aquellos que mostraban la presencia del antígeno tumoral SV 40) siempre retenían el cromosoma humano número 7, unas veces sólo y otras con cromosomas humanos distintos. Por contra, los clones antígeno-negativos retenían diversas combinaciones de todos los demás cromosomas humanos, pero no retenían el número 7. En los casos en que los clones antígeno-positivos perdían subsiguientemente el cromosoma humano número 7, se pudo demostrar que dichos clones devenían antígeno-negativos. Había que deducir, pues, que el gen que codificaba para la expresión del antígeno tumoral del SV 40 debía formar parte del cromosoma humano número 7. Solamente pudimos recuperar



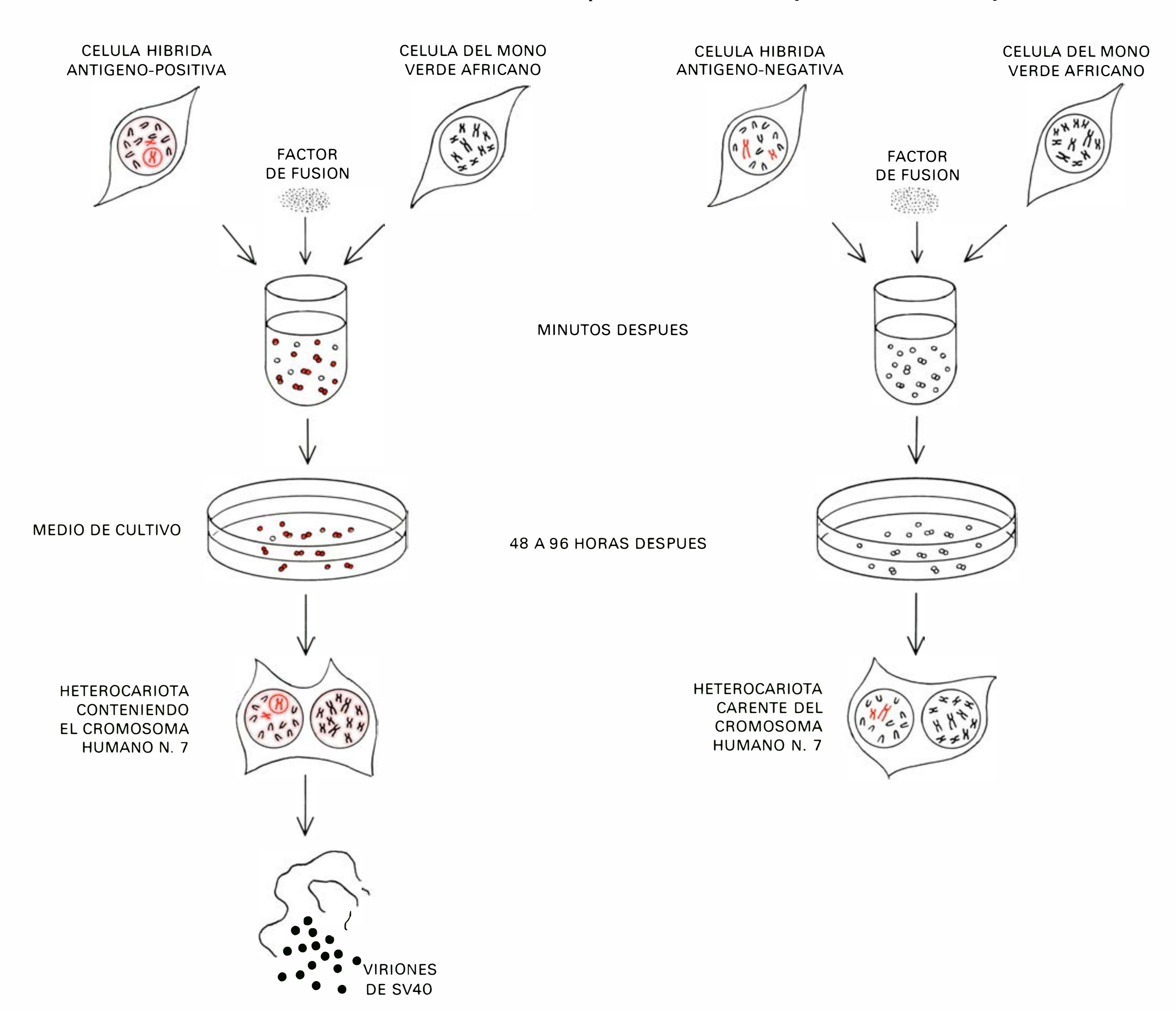
TECNICA DE HIBRIDACION empleada por los autores y sus colaboradores en el Wistar Institute of Anatomy and Biology de Filadelfia. El virus SV 40 se utilizó primeramente para transformar células humanas obtenidas de pacientes con un déficit del enzima hipoxantina fosforribosil transferasa (HPRT). Se fusionaron las células humanas transformadas con células de ratón deficitarias en el enzima timidín kinasa (TK), proceso que viene facilitado por la información de un factor químico de fusión. La mezcla de células fusionadas y no fusionadas se coloca seguidamente en un medio de cultivo que contenga otras tres sustancias: hipoxantina, aminopterina y timidina (HAT). Las células deficientes en HPRT o en TK mueren en el medio HAT, pero las células heterocariotas que han sufrido fusión (células con más de un tipo de núcleo) sobreviven, debido a que ellas contienen ambos enzimas: HPRT del ratón deficiente en TK y TK de las células humanas deficientes en HPRT. Las células híbridas –cada una de las cuales porta la dotación cromosómica del ratón completa, y sólo unos pocos de los cromosomas humanos– crecen en colonias celulares llamadas clones, en el medio HAT. Los clones híbridos que mantienen el cromosoma humano número 7 son antígeno-positivos, mientras que los que mantienen combinaciones de cromosomas humanos distintos del número 7 son antígeno-negativos. Las células antígeno-positivas que posteriormente llegan a perder el cromosoma humano número 7 se convierten en células antígeno-negativas.

viriones de SV 40 (partículas víricas) de aquellas células híbridas que contenían el cromosoma humano número 7; ello confirmaba nuestros primeros hallazgos y probaba que el genoma del SV 40 se integraba realmente en el cromosoma humano número 7 *(véase la ilustración inferior).*

En ensayos posteriores, realizados con George Khoury, del National Institute of Allergy and Infectious Diseases, extractamos el ADN de doble hebra de los clones híbridos tanto antígeno-positivos como antígeno-negativos, y separamos las hebras por calentamiento a una alta temperatura. Se separó también el ADN de viriones de SV 40 en hebras simples por calentamiento, luego las hebras simples resultantes se aparearon con el ADN celular a una temperatura más baja. La velocidad de reacción de apareamiento entre el ADN viral y el ADN celular depende de la cantidad de ADN viral presente inicialmente en el ADN obtenido a partir de las células híbridas. Este método nos permitió determinar el número de moléculas del ADN de SV 40 presentes ya en las células híbridas. Los resultados de este experimento indicaban que el ADN de SV 40 estaba integrado solamente en el ADN celular de las células híbridas que contenían el cromosoma humano número 7, y que el número de moléculas de ADN de SV 40 por célula híbrida era el mismo que la cantidad de cromosomas número 7 presente en las células híbridas. Además, no pudieron detectarse moléculas de ADN de SV 40 en las células híbridas en que el cromosoma humano número 7 estaba ausente.

A fin de determinar si los genes celulares de los cromosomas humanos portadores del genoma del virus SV 40 eran o no funcionales en las células híbridas, revisamos las células híbridas antígeno-positivas y antígeno-negativas para detectar la presencia del enzima beta-glucuronidasa, cuyo gen se sabe que forma parte del cromosoma humano número 7. Resultó que solamente aquellas células híbridas que expresaban el antígeno tumoral de SV 40, y que también contenían el cromosoma humano número 7, expresaban la forma humana de este enzima.

Se acometieron pruebas adicionales para determinar si la presencia del cro-

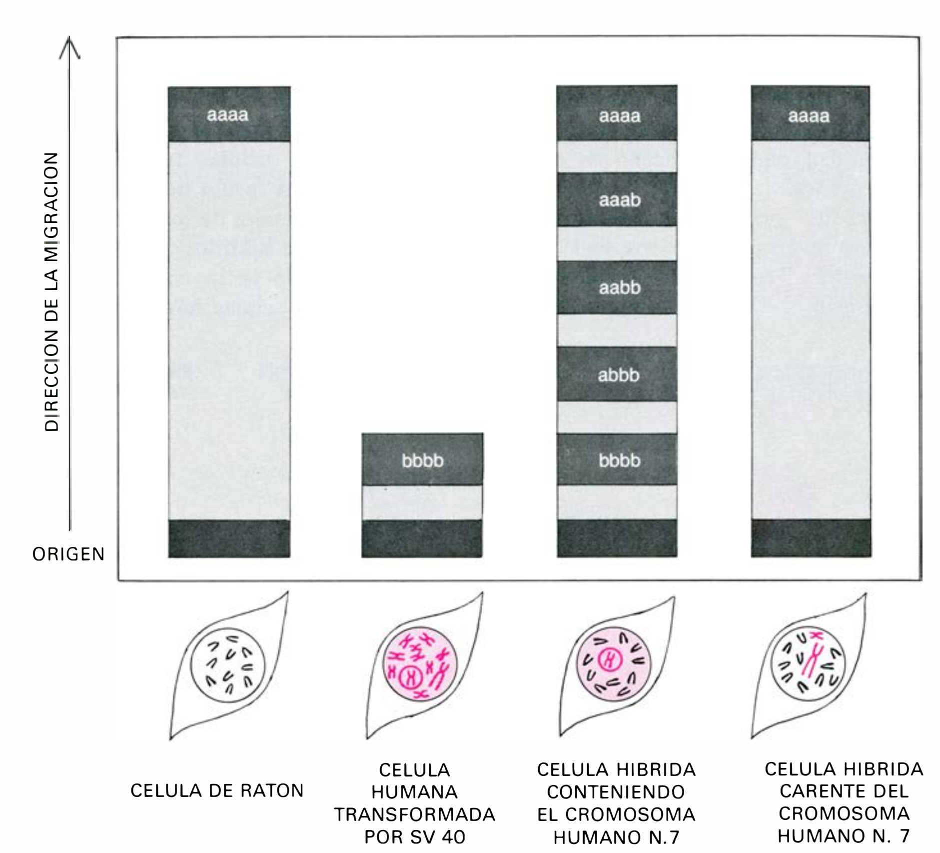


LOS VIRIONES DE SV 40 (partículas víricas) pueden recuperarse a partir de células híbridas transformadas por SV 40 tras la fusión de éstas, de nuevo, con las células de riñón de mono verde africano, que se sabe producen factores que promueven la replicación del virus SV 40. En este experimento, tanto los híbridos antígeno-positivos (que contienen el cromosoma número 7) como los híbridos antígeno-negativos (que contienen cromosomas humanos distintos del número 7) fueron fusionados con células renales del mono. Cuando los nuevos híbridos se sometieron posteriormente a análisis, se descubrió que los viriones de SV 40 podrían detectarse solamente en los heterocariotas derivados de los clones híbridos antígeno-positivos, y no en los derivados de los clones híbridos antígeno-negativos; ello confirmaba que el genoma, o dotación completa de genes, del virus SV 40 se encontraba realmente integrado en el interior del cromosoma humano número 7.

mosoma humano número 7 en las células híbridas resultaría en su capacidad para formar tumores. Al igual que el experimento anterior, se fusionaron células humanas transformadas por SV 40 con fibroblastos de ratón (célula de normal propagación del tejido conjuntivo que en condiciones ordinarias es incapaz de formar colonias en un medio de cultivo semisólido). No obstante, en esta ocasión las células humanas transformadas se fusionaron con macrófagos de ratón, que son células indivisibles obtenidas de la cavidad peritoneal del animal. Todas las células se desarrollaron luego en un medio HAT, resultando en la selección de una variedad de clones híbridos *(véase la ilustración de la página 74).*

Los clones híbridos resultantes de la fusión de las células humanas transformadas por virus con los fibroblastos de ratón retenían el cromosoma humano número 7 y, además, expresaban el antígeno tumoral SV 40, o retenían cromosomas humanos, distintos del número 7 y no expresaban el citado antígeno tumoral. Todos los clones híbridos resultantes de la fusión de las células humanas transformadas por virus con los macrófagos de ratón contenían, por otra parte, el cromosoma humano número 7 y expresaban el antígeno tumoral SV 40; en alguno de estos clones, el cromosoma humano número 7 era el único cromosoma presente de todos los del genoma humano. La proliferación de los híbridos de las células humanas con los macrófagos de ratón indica que el cromosoma humano número 7 que contiene el genoma del SV 40, contribuye con uno o más factores que resultan en la replicación de células que, de lo contrario, no podrían proliferar. Todos los clones híbridos que expresan el antígeno tumoral SV 40 pueden formar colonias en un medio de cultivo semisólido, una de las pruebas que resultan claves para distinguir las células transformadas. En contraposición, los híbridos formados por la fusión de células humanas con los fibroblastos de ratón que habían perdido la capacidad para expresar el antígeno tumoral SV 40 fueron incapaces de formar colonias en un medio semisólido.

Las células híbridas que contenían el cromosoma humano número 7 y expresaban el antígeno tumoral SV 40 demostraron posteriormente su capacidad para inducir tumores cuando se inyectaron a ratones "desnudos" (una raza de laboratorio carente de pelo, empleada frecuentemente en tales experimentos como un huésped, ya que carece de timo y,



CELULAS PARENTALES Y CELULAS HIBRIDAS, analizadas por medio de una técnica electroforética para investigar la presencia del enzima beta-glucuronidasa, cuyo gen se sabe forma parte del cromosoma humano número 7. Se colocaron extractos de ambas líneas celulares parentales (células de ratón normal y células humanas transformadas por SV 40) y extractos de ambas líneas celulares híbridas (antígeno-positivas y antígeno-negativas) en ranuras en la base de una membrana de acetato de celulosa; y se expusieron a un campo eléctrico, en el que las formas humanas y de ratón, del enzima, migran a diferentes velocidades. Ambas formas del enzima tienen una estructura constituida por cuatro partes, expresada aquí por medio de las letras *aaaa* para la forma del ratón y *bbbb* para la forma humana. Por tanto, se esperaría encontrar en los híbridos que transportaban el gen para la beta-glucuronidasa, además de las dos formas parentales del enzima *(aaaa* y *bbbb),* tres combinaciones diferentes de las dos formas parentales *(aaab, aabb* y *abbb).* Sucede que los clones híbridos que retienen el cromosoma humano número 7 y son antígeno-positivos producen las formas parentales y las formas combinadas del enzima, en tanto que las células que carecen del cromosoma humano número 7 y son antígeno-negativas rinden solamente la forma del ratón. Ello demostró que los genes celulares normales del cromosoma humano, portador del genoma del SV 40, eran funcionales en las células híbridas transformadas por virus.

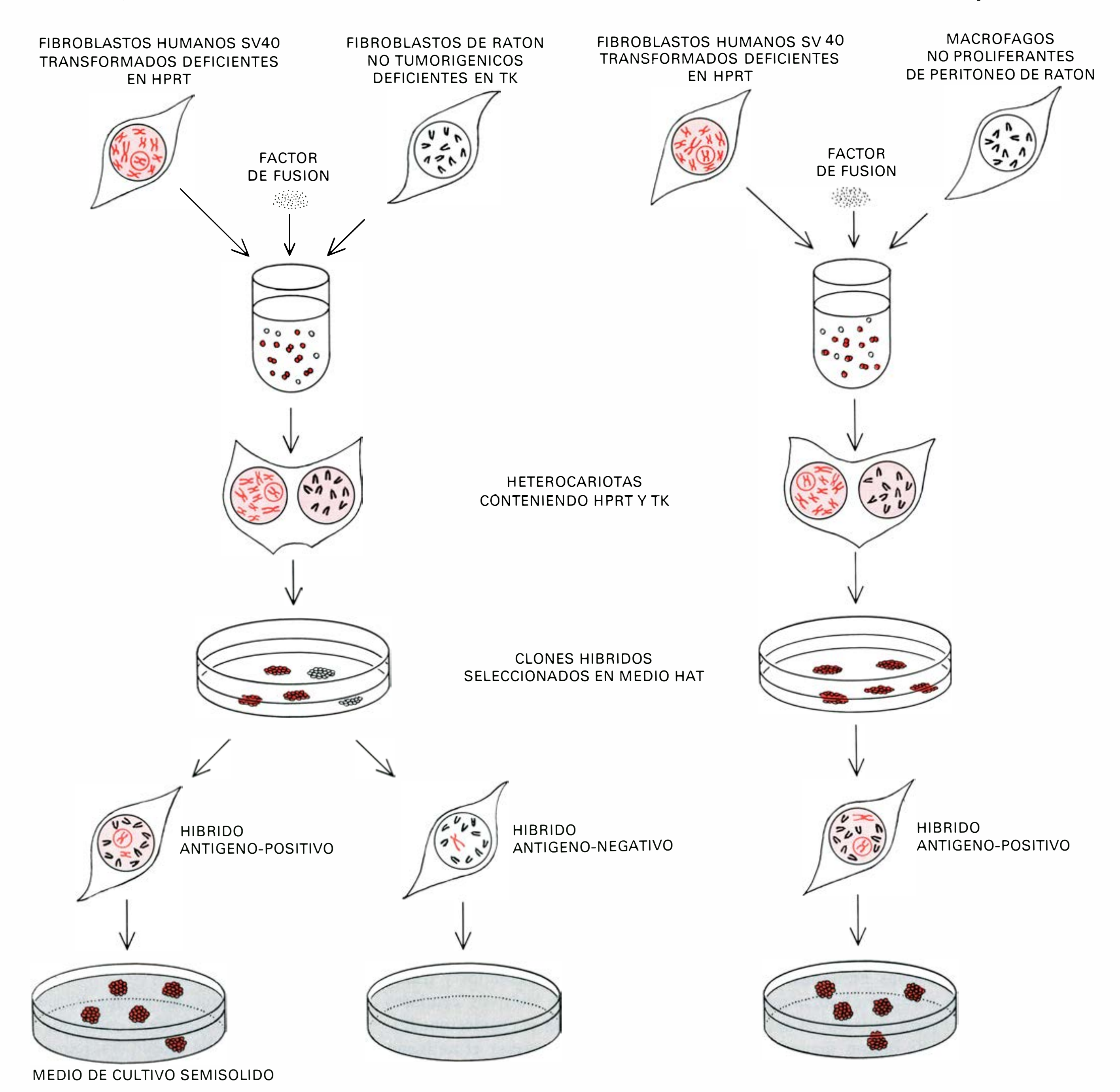
por tanto, es incapaz de rechazar trasplantes de tejidos extraños) *(véase la ilustración de la página 75).* Por el contrario, ratones desnudos a los que se inyectaron células que carecían del cromosoma humano número 7, y eran antígeno-negativas, no desarrollaron tumores. Células derivadas de los tumores inducidos en ratones desnudos y transferidos a frascos de cultivos celulares demostraron contener el cromosoma humano número 7 y expresar el antígeno tumoral SV 40.

(En un experimento relacionado descubrimos que cuando las células humanas transformadas por SV 40, que procedían de un paciente con otro tipo de enfermedad producida por un déficit enzimático, la galactosemia, se fusionaron con fibroblastos de ratón o con macrófagos peritoneales, era el cromosoma humano número 17, y no el número 7, el retenido por todos los clones híbridos antígeno-positivos, y era él, por tanto, el responsable de la expresión de la neoplasia en las células híbridas. Además, cabe el que los lados de interacción para el ADN del SV 40 puedan hallarse en cromosomas humanos distintos del número 7 y del número 17 en otros tipos de células humanas transformadas por SV 40).

En razón de que las células híbridas portadoras de la dotación completa de 40 cromosomas del ratón (19 pares de autosomas y dos cromosomas sexuales) junto con el cromosoma, o cromosomas humanos que porten el genoma viral siempre resultaron ser tumorigénicos, se hizo evidente que el carácter de tumorigenicidad se hereda como un rasgo dominante en las células transformadas por SV 40. Puesto que las células humanas pueden transformarse, similarmente, por ciertos virus de ARN, parecía razonable esperar que la localización

cromosómica del genoma del virus tumoral de ARN podría también ser investigada en células humanas transformadas por medio de la técnica de fusión. Esta posibilidad nace del hecho de que virus tumorales de ARN contienen un importante enzima denominado transcriptasa inversa, descubierto en 1970 por Howard E. Temin, de la Universidad de Wisconsin, y David Baltimore del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Este enzima es capaz de transcribir el ARN del virus en ADN complementario, que pasa a integrarse luego en el ADN celular de las células transformadas. Hallamos que la fusión de estas células con células normales de ratón resulta en la formación de híbridos que son tumorigénicos cuando se inyectan a ratones desnudos. Las células híbridas tumorigénicas contienen la dotación cromosómica completa del ratón pero no más de cinco cromosomas humanos. Por tanto, la capacidad del virus de ARN para formar tumores parece heredarse también como carácter dominante.

La hibridación de células de ratón con células humanas transformadas por virus oncógenos de ADN o de ARN introduce nuevos caminos para la identi-



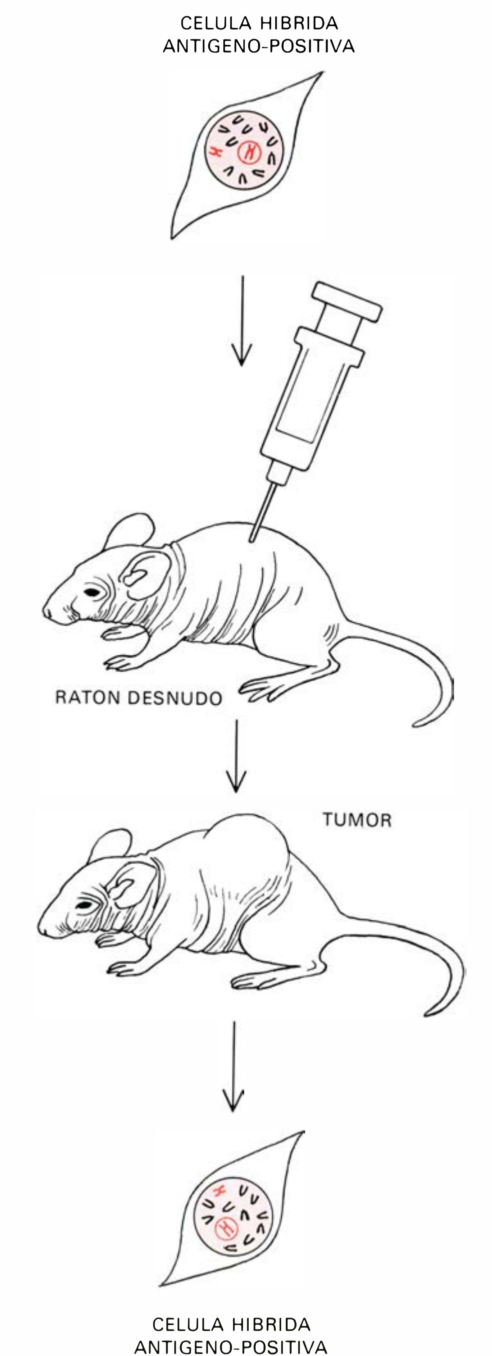
PRUEBA ULTERIOR de que el genoma del virus SV 40, al incluir uno o más factores responsables de su replicación, se integra dentro del cromosoma humano número 7 en células humanas transformadas por SV 40. En este experimento, las células humanas transformadas por SV 40, deficientes en HPRT, se fusionaron no sólo con fibroblastos de ratón (célula del tejido conjuntivo de propagación normal), sino que también lo hacían con macrófagos de ratón (células no divisibles obtenidas de la cavidad peritoneal del animal). Se hicieron crecer todas las células en medio HAT, lo que resultó en la selección de diversos clones híbridos. Los híbridos procedentes de la fusión de los fibroblastos de ratón con las células humanas transformadas por el virus o bien mantenían el cromosoma humano número 7 y eran antígeno-positivas, o retenían cromosomas humanos distintos del 7 y eran antígeno-negativas. Los clones supervivientes, que procedían de la fusión de los macrófagos del ratón con las células humanas transformadas por virus, retenían, por otra parte, e invariablemente, el cromosoma humano número 7 y eran antígeno-positivas (los híbridos derivados de macrófagos de ratón que contienen cromosomas humanos diferentes del número 7 caen presumiblemente en la multiplicación y desaparecen). Según esto, el cromosoma humano número 7 es el responsable de la proliferación de estas células que, de otra manera, no proliferarían. Ambos tipos de híbridos podrían propagarse en un medio semisólido, siempre que continuasen siendo antígeno-positivos y mantuviesen el cromosoma número 7. El crecimiento en dicho medio semisólido se considera propio de las células transformadas.

ficación de los cromosomas humanos responsables de la expresión de neoplasias en ciertos tipos de cánceres humanos. Este enfoque permite determinar si la integración de genomas de virus oncógenos en el ADN celular tiene lugar en sitios cromosómicos específicos o preferenciales o es un acontecimiento aleatorio. La pérdida de parte de la dotación cromosómica humana normal constituye la clave para el éxito de estos estudios.

Se halló una excepción a esta regla general en el caso de células híbridas formadas por la fusión de células humanas que procedían de un fibrosarcoma (tumor humano del tejido conjuntivo altamente maligno) con macrófagos de ratón o con otras células obtenidas directamente del ratón vivo *(véase la ilustración de la página 76).* En este caso, todas las células híbridas demostraron ser tumorigénicas en ratones desnudos. Los híbridos pierden, de preferencia, cromosomas de ratón, mientras mantienen toda la dotación cromosómica humana. En contraposición a ello, los híbridos de células somáticas, formados por fusión del mismo tipo de células de fibrosarcoma humano, con fibroblastos de ratón normal mantenidos en cultivo en el laboratorio, demostraron perder preferentemente los cromosomas humanos, como en el caso de los híbridos entre células de ratón y células humanas transformadas por SV 40.

Las células híbridas en los dos últimos casos se segregan en clones, algunos de los cuales son tumorigénicos y otros no. En resumen, empleando células de fibrosarcoma humano en un experimento de hibridación, no sólo podríamos identificar el cromosoma, o cromosomas humanos responsables de la expresión de malignidad, sino determinar también la localización de genes en los cromosomas de ratones.

Boveri postuló que, en adición a la "combinación cromosómica anormal simple, que da a la célula la cualidad de malignidad", pueden existir "cromosomas inhibitorios". Y añadía que "células de tumores con crecimiento ilimitado podrían así desarrollarse", si se eliminaran tales cromosomas inhibitorios. Basado en la observación de que los híbridos de células somáticas entre células normales y malignas de ratón son malignos solamente cuando se pierden cromosomas de ratón, varios investigadores han venido sugeriendo en los últimos años que las células normales deben contener genes capaces de suprimir la capacidad celular de inducir tumores; la pérdida de "cromosomas inhibidores" portadores de estos genes resultaría, por tanto, en la expresión de la malignidad. Nuestros resultados, obtenidos a través de la experimentación con híbridos interespecíficos formados por fusión de células humanas transformadas por virus o células de fibrosarcoma humano con células normales de ratón, indican, por el contrario, que la malignidad es un carácter dominante. Además, híbridos for-

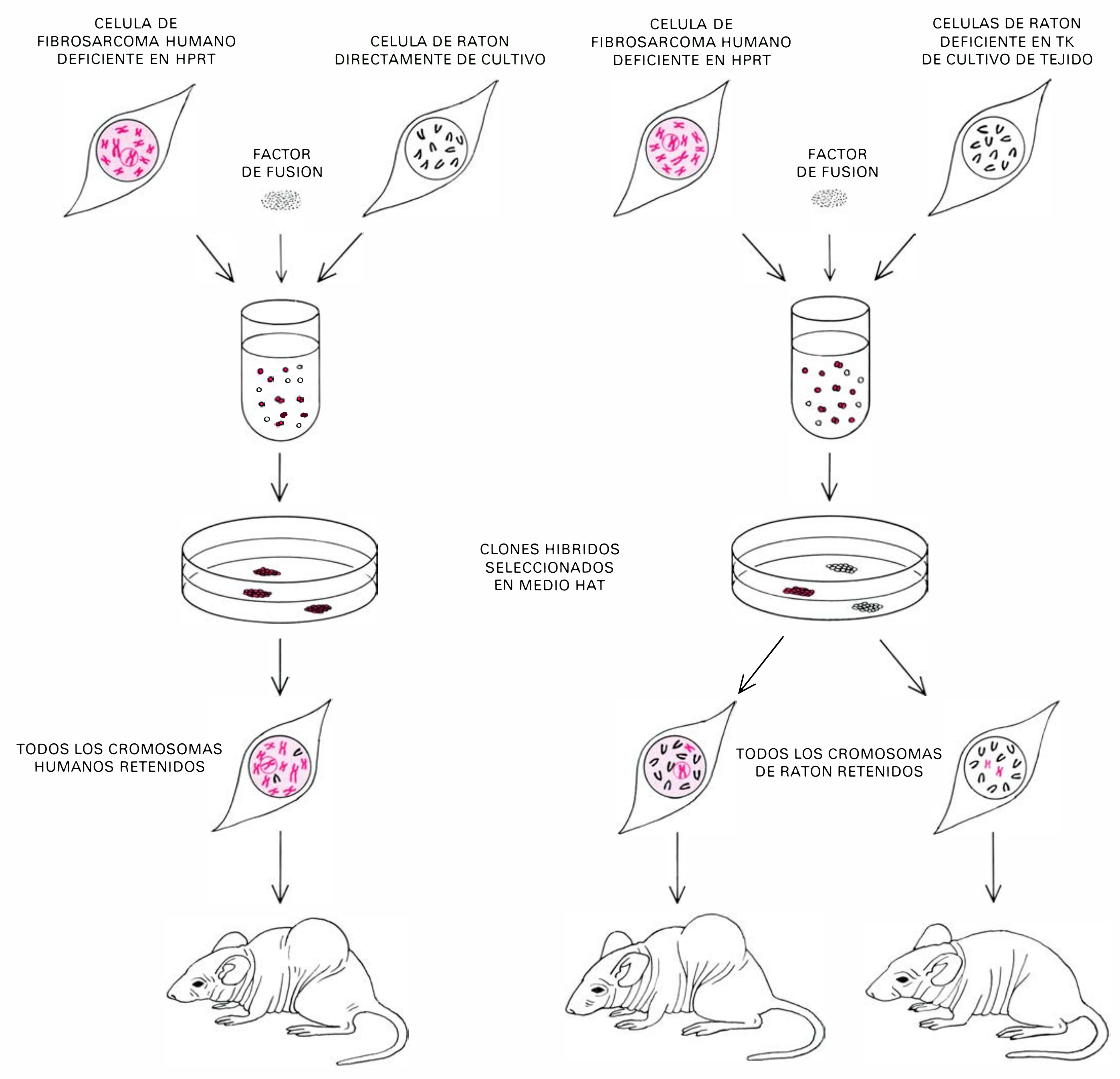


INDUCCION DEL TUMOR en los ratones "desnudos" (una cepa de ratones de laboratorio especialmente desarrollada) a través de células híbridas antígeno-positivas, inyectadas en el animal, que contenían el cromosoma humano número 7. Los ratones desnudos que fueron inyectados con células híbridas antígeno-negativas, que carecían del cromosoma humano número 7, no desarrollaron el tumor. El análisis subsiguiente de las células obtenidas de los tumores demostró que todas ellas eran antígeno-positivas y contenían el cromosoma humano número 7.

mados por la fusión de células de fibrosarcoma humano y células humanas normales se comportan como células tumorales, aun cuando mantengan la dotación cromosómica completa de ambas células parentales.

Hasta ahora hemos examinado cómo distintos agentes ambientales desencadenantes –incluyendo virus– pueden inducir cánceres humanos, ya sea a través de mutaciones del ADN celular, ya sea a través de la integración de genomas virales en el ADN celular. ¿Hay casos de neoplasia causada por cambios en la función génica más que en la estructura génica? Los hay. Un ejemplo de tales neoplasias es el teratoma, un tumor que afecta principalmente a las gónadas. Los teratomas contienen muchos tejidos diferentes; entre ellos: la piel, los músculos, el tejido adiposo, las glándulas, los pelos y los dientes. Todos derivan de células totipotentes: células que, por definición, son capaces de desarrollarse en todos los tejidos del cuerpo. Los teratomas pueden inducirse en animales de experimentación implantando un embrión en un lugar anómalo del cuerpo del animal, típicamente bajo la cápsula renal.

En dos experimentos recientes, Ralph L. Brinster, de la School of Veterinary Medicine, de la Universidad de Pensylvania, y más tarde Beatrice Mintz y Karl Illmense, del Institute for Cancer Research de Filadelfia, inyectaron células totipotentes extraídas de teratomas en la cavidad de un blastocisto (un embrión de pocos días) obtenido de un ratón normal perteneciente a una cepa distinta de aquella otra de la cual procedían las células del teratoma. El

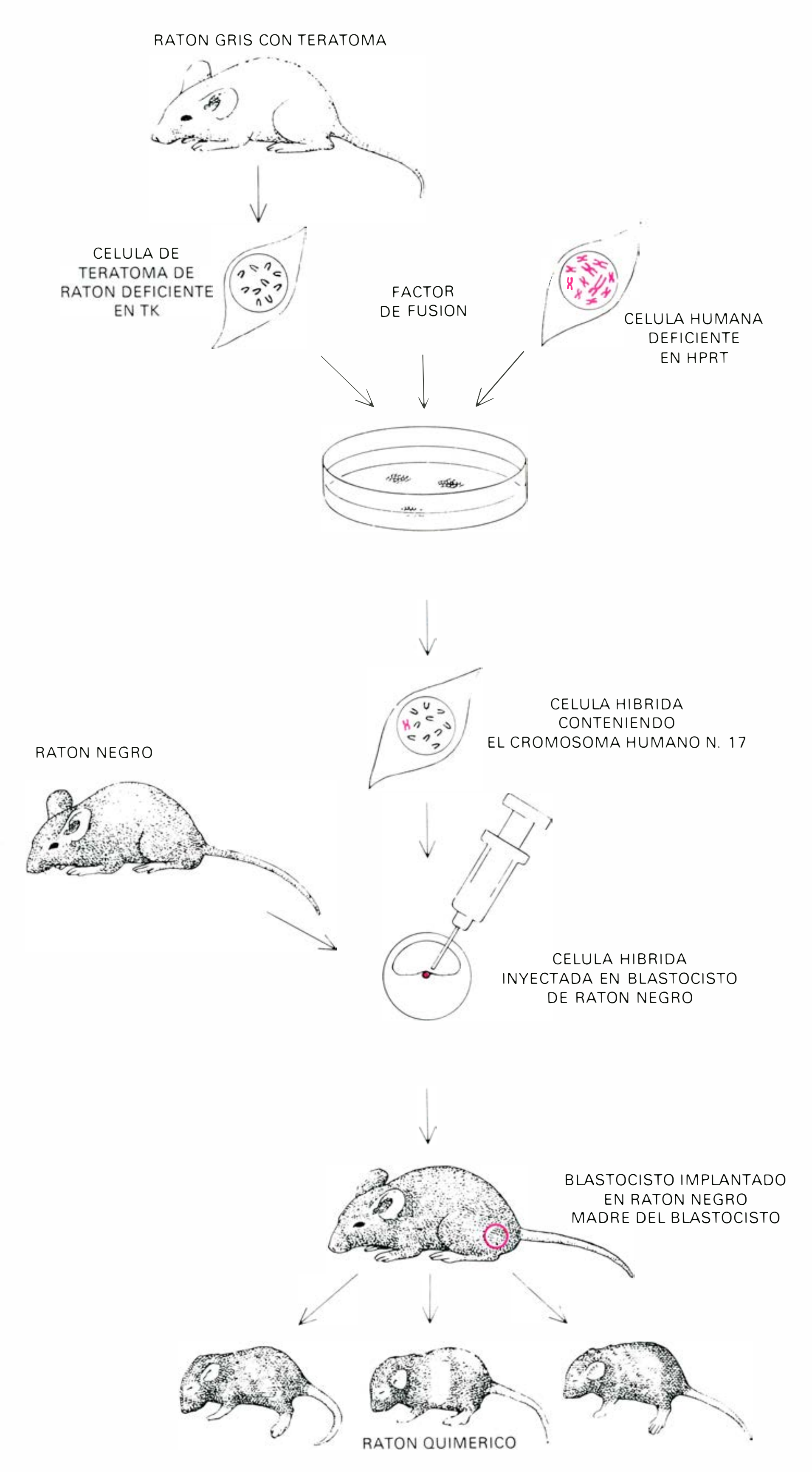


PERDIDA PREFERENCIAL de cromosomas. Este fenómeno es raro en el caso de células híbridas formadas por la fusión de células humanas procedentes de un fibrosarcoma (tumor del tejido conjuntivo) con células del ratón obtenidas de tejido animal. Estos híbridos tienden a perder cromosomas del ratón, en tanto que retienen la dotación cromosómica humana completa. Todas las células híbridas resultantes mostraron producir tumores en ratones desnudos *(diagrama de la izquierda)*. **Por el contrario, híbridos formados por la fusión del mismo tipo de células de fibrosarcoma con fibroblastos normales de ratón, mantenidos en cultivos de laboratorio, demostraron perder preferentemente cromosomas humanos. Las células híbridas del último caso se segregan en clones: unos de ellos son tumorigénicos y otros no** *(diagrama de la derecha).*

blastocisto que contenía el teratoma se implantó luego quirúrgicamente en el útero del ratón de que el blastocisto provenía. Después del desarrollo normal de los embriones desarrollados a partir de los blastocistos implantados, los ratones que nacieron resultaron ser quiméricos, es decir, tenían en sus tejidos normales células procedentes del blastocisto y células provenientes del teratoma. Más aún, ciertos productos génicos tejido-específicos, como la hemoglobina y la inmunoglobulina, se encontró que eran específicos de la cepa de ratón de la que el teratoma derivaba. Dado que las células del teratoma devinieron perfectamente normales y se habían desarrollado en tejidos normales, cuando fueron colocadas en su ambiente adecuado (el blastocisto), se puede concluir que los teratomas son causados por cambios en la función génica y no por mutaciones del genoma celular.

Aprovechando el hecho de que células totipotentes de teratoma de ratón pueden crecer en cultivo de tejidos, hemos producido células de teratoma de ratón deficientes en TK, que son capaces de diferenciarse en tejido normal de ratón al inyectarse en blastocistos de ratón. Las células resultantes se fusionan luego con células humanas, y los híbridos retienen el cromosoma humano número 17, portador del gen que codifica para el enzima TK. Las células híbridas se inyectan posteriormente en blastocitos de ratón implantados a su vez en los ratones madres de donde procede el blastocisto. Los ratones quiméricos que nacen contienen tejidos derivados tanto del blastocisto como de las células híbridas *(véase la ilustración de la derecha)*. La cuestión de si el enzima TK humano se expresa en estos ratones es hoy objeto de investigación.

Un interesante experimento a realizar en el futuro será la producción de híbridos mediante la fusión de células de teratoma de ratón con células humanas extraídas de pacientes con cánceres familiares. Tales híbridos, al haber perdido la mayoría de los cromosomas humanos, pero retener la información genética responsable de la expresión de –por ejemplo– el retinoblastoma o la poliposis del colon, podrían inyectarse luego en blastocistos de ratón, que a su vez serían implantados en úteros maternos de la cepa de donde provenía el blastocisto. Si una progenie viable se desarrollase como resultado de este procedimiento, ello abriría una vía completamente nueva para explorar los efectos de los genes del cáncer humano en un animal de experimentación.



CELULAS TOTIPOTENTES son las que, por definición, pueden desarrollarse en las células de todos los tipos de los tejidos del cuerpo. Como aquí se ve, pueden obtenerse de un ratón de laboratorio con un teratoma, que es un tumor de las gónadas. Cuando se fusionaron las células del teratoma, que han devenido deficientes en el enzima TK, con células humanas deficientes en HPRT, y se seleccionaron clones híbridos en el medio HAT, los híbridos resultantes demostraron retener el cromosoma humano número 17 que es portador del gen para el enzima TK. Las células híbridas se inyectaron luego en blastocistos de ratón (embriones de pocos días) que fueron posteriormente implantados en el ratón madre de donde procedía el blastocisto. El ratón quimérico –o multicoloreado– que nació resultó contener tejidos que habían derivado de blastocistos y células híbridas.

Supergravedad y la unificación de las leyes de la física

En esta nueva teoría, la fuerza gravitatoria surge de una simetría que relaciona partículas con propiedades muy diferentes. El resultado final puede ser una teoría que unifique las fuerzas básicas de la naturaleza

Daniel Z. Freedman y Peter van Nieuwenhuizen

Una lista de los constituyentes fundamentales del universo tendría que incluir docenas e incluso cientos de partículas materiales que interaccionen mutuamente mediante cuatro clases de fuerzas: fuerte, electromagnética, débil y gravitatoria. Puesto que no hay una razón obvia para que la naturaleza sea tan complicada, es quizá por lo que la meta más ambiciosa de la física moderna sea descubrir, en la diversidad de partículas y fuerzas, un orden subyacente más simple. De un modo particular, se lograría una comprensión más satisfactoria de la naturaleza si se pudiesen unificar de alguna manera las cuatro fuerzas. En teoría, debería demostrarse que todas ellas tienen un origen común; que podrían considerarse como diferentes manifestaciones de una fuerza única y más fundamental.

En los últimos 50 años se ha registrado un avance considerable en la identificación de las partículas elementales de la materia y en la comprensión de las interacciones entre ellas. Por supuesto que quedan muchos problemas por resolver; de entre ellos, dos de los más fundamentales se refieren a la gravitación. El enunciado del primero reza así: se desconoce cuál sea la relación entre la gravitación y otras fuerzas fundamentales; el del segundo: no existe una teoría viable de la gravitación que sea coherente con los principios de la mecánica cuántica. Recientemente, sin embargo, una nueva teoría de la gravitación, llamada supergravedad, ha dado pie a nuevas ideas en la comprensión de ambos problemas; y puede significar un paso hacia adelante en la solución de los mismos.

La gravitación fue la primera de las fuerzas fundamentales de la naturaleza que se reconoció, y la primera para la que se encontró una teoría matemáticamente precisa, a saber, la teoría publicada por Newton en sus *Principia*, en 1687. Newton propuso la sencilla ley de que la fuerza gravitatoria actúa universalmente entre cualquier par de partículas con una intensidad directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Pudo calcular, entonces, tanto los movimientos de los proyectiles terrestres, que estaban de acuerdo con las observaciones de Galileo, como las órbitas de los planetas, conformes con las leyes empíricas del movimiento planetario formuladas por Kepler. El desarrollo de una ley, para la fuerza, que describía correctamente los movimientos terrestres y los astronómicos constituyó una síntesis única.

Se llevó a cabo una unificación similar en el tratamiento del electromagnetismo. Para los filósofos de la naturaleza del siglo XVIII no había ninguna relación aparente entre la electricidad estática generada al peinarse el pelo, la fuerza magnética sobre la brújula y la luz emitida por una bujía o por el sol. Sin embargo, James Clerk Maxwell demostró, un siglo más tarde, que todos estos fenómenos estaban relacionados mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales, que se conocen hoy por ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético.

Hacia finales del siglo XIX, prevalecía la opinión de que todas las complejas manifestaciones de la gravitación y el electromagnetismo podían describirse de acuerdo con las leyes de Newton y Maxwell. Lo único que quedaba era trabajar y agotar hasta el final las consecuencias de las ecuaciones. Esta risueña perspectiva se rompió por una serie de resultados experimentales que se obtuvieron en las décadas inmediatas, anteriores y posteriores, al cambio de siglo. Surgió una discrepancia importante entre la teoría y el experimento con el descubrimiento de que la velocidad de la luz, a diferencia de lo que ocurre con la velocidad de las otras ondas, no depende del movimiento del observador. Se topó con otro escollo a la hora de interpretar las líneas discretas en los espectros de los átomos. Se conocía, desde hacía mucho tiempo, que los átomos emiten luz sólo en frecuencias particulares y características, pero esta observación no se podía conciliar con el hallazgo de que los átomos constaban de electrones en órbita alrededor de un núcleo pequeño y denso. La teoría de Maxwell predecía que el espectro emitido, al caer los electrones en espiral hacia el núcleo, sería continuo.

Estas dificultades se resolvieron con el desarrollo de dos teorías que habrían de constituir los cimientos de la física moderna: la teoría especial de la relatividad y la mecánica cuántica. Con el fin de alcanzar la solución, fue necesario abandonar los conceptos de tiempo absoluto y de determinismo en el movimiento de las partículas, conceptos tan profundamente arraigados que resultó difícil reconocer que se trataba realmente de suposiciones encubiertas. En el marco de la relatividad especial, el tiempo y el espacio estaban relacionados, y, en el de la mecánica cuántica, las partículas y las ondas eran equivalentes. Se pudo entender entonces por qué la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores y por qué las líneas espectrales de los átomos tienen frecuencias fijas y discretas.

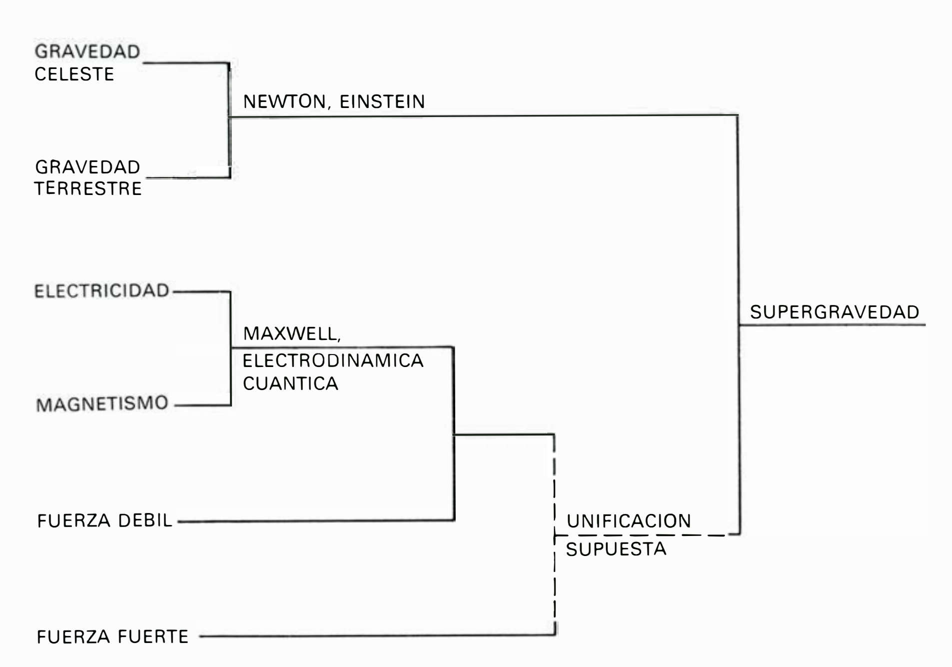
Dado que en la teoría de la gravitación de Newton el espacio y el tiempo no poseen la estrecha relación que tienen en la teoría de la relatividad especial, se hacía necesaria una revisión de la teoría de la gravitación. Esta fue propuesta por Einstein en 1916 y se llamó teoría general de la relatividad, que ha llegado a ser también piedra fundamental de la física moderna.

A principios del siglo XX se descubrieron dos nuevas fuerzas fundamentales de la naturaleza. Eran la interacción débil, responsable de la desintegración beta de los elementos radiactivos, y la interacción fuerte, que liga protones y neutrones en el núcleo atómico. Estas fuerzas no se habían descubierto antes porque sólo son eficaces en el pequeño rango de las distancias subatómicas, en tanto que la gravitación y el electromagnetismo son fuerzas de largo alcance, que pueden observarse macroscópicamente.

Las cuatro fuerzas presentan una sorprendente variedad de propiedades. Aparte de las diferencias en el rango ya mencionadas, existen desigualdades todavía mayores en cuanto a su fuerza efectiva. Como era de esperar, las interacciones fuertes son las más intensas de las cuatro (a pequeñas distancias). Si la interacción fuerte entre dos protones se define como una fuerza de orden 1, la fuerza electromagnética entre las mismas partículas será de un orden 10^{-2} aproximadamente, y, la débil, de orden 10^{-5}. La fuerza gravitatoria es extraordinariamente débil, con una intensidad intrínseca de orden 10^{-39}. Se puede visualizar cuán débil es esta fuerza, imaginando un átomo en el que los electrones estén ligados al núcleo por gravitación en vez de estarlo por electromagnetismo; un solo átomo de hidrógeno tendría un tamaño mayor que el que se estima para el universo.

A pesar de las distintas propiedades de las cuatro fuerzas, es natural que se trate de buscar una teoría más profunda en la que tuvieran un origen común. Einstein dedicó gran parte de sus últimos años a la búsqueda de una teoría que unificase los campos gravitatorio y electromagnético. Otros físicos se sumaron al esfuerzo; sin embargo, los resultados de sus trabajos nunca fueron convincentes, debido quizás a que no incorporaron las ideas mecanocuánticas en sus teorías.

En la última decada, las interacciones débiles y electromagnéticas se unificaron en el trabajo de Steven Weinberg, de la Universidad de Harvard, y, posteriormente, en el de Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, y en el de John Ward, de Nueva Zelanda. Se pensó que un tratamiento similar podría abarcar también la fuerza nuclear. Por ironía de las cosas, en dicha síntesis no se incluye la fuerza conocida desde hace mucho más tiempo: la gravitación.



LA HISTORIA DE LAS TEORIAS FISICAS sugiere un desarrollo gradual hacia la unificación. La primera gran síntesis fue lograda por Newton, quien demostró que el movimiento de los proyectiles en la tierra y las órbitas de los planetas podían explicarse por la misma ley. De una manera similar, James Clerk Maxwell ideó una teoría única que abarcaba la electricidad y el magnetismo. En el siglo XX, la teoría de Newton se sustituyó por la teoría general de la relatividad de Einstein, y la teoría de Maxwell se amplió hasta crear una teoría cuántica de campos, llamada electrodinámica cuántica. Recientemente, la fuerza débil se ha unido al electromagnetismo. La interacción fuerte se describe también por una teoría cuántica de campos, y, últimamente, se pueden considerar las tres fuerzas (fuerte, débil y electromagnética) como manifestaciones de un principio único. Supergravedad es la teoría desarrollada en los dos años postreros; describe la gravitación en el lenguaje de teoría cuántica de campos. Esta teoría no se ha sometido a contrastación experimental, no obstante y al parecer, podría unificar todas las fuerzas de la naturaleza.

La teoría de la supergravedad sugiere un nuevo enfoque en el tema de la unificación. La supergravedad es una extensión de la relatividad general, y da las mismas predicciones para las pruebas clásicas de la teoría de Einstein, tales como la precesión de las órbitas planetarias, la curvatura de la luz proviniente de una estrella al pasar cerca del sol, el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales estelares y el retardo de las señales de radar al pasar a través del campo gravitatorio solar. Sin embargo, a nivel microscópico o cuántico, la supergravedad es distinta de la relatividad general. Cuando se calcula la probabilidad de ciertos efectos mecanocuánticos de la gravitación en relatividad general, la probabilidad resulta infinita, lo que es una conclusión sin sentido. En supergravedad se han obtenido, hasta ahora, respuestas finitas en todos los cálculos realizados.

Para la construcción de teorías físicas resulta útil guiarse por principios de simetría, que permiten que una ley describa objetos o conceptos que no parecían estar relacionados. Como se explicará más adelante, una simetría de una teoría física puede adoptar forma global o local. Las teorías con simetría local, a las que también se les llama teorías gauge, han resultado ser mucho más eficaces. La teoría general de la relatividad y la teoría de Maxwell del electromagnetismo se basan en simetrías locales. Las teorías recientes de campos, que unifican interacciones débiles y electromagnéticas, son también teorías gauge. De aquí que se haya sospechado que cualquier teoría que unifique las cuatro fuerzas debería poseer también simetría local.

La supergravedad está basada en una nueva simetría, tan notable incluso a nivel global, que se le ha dado el nombre de supersimetría. La supersimetría relaciona las dos grandes clases de partículas elementales, a saber, los fermiones (verbigracia, electrón, protón y neutrón) y los bosones (como el fotón). Fermiones y bosones tienen propiedades enormemente diferentes, y el hallazgo de una relación fundamental entre ellas fue completamente inesperado. En supergravedad, la supersimetría se extiende del

nivel global al local. Notablemente, esta extensión conduce de forma automática a teorías que incorporan la fuerza gravitatoria, y sugiere la posibilidad de unificar la gravitación con otras fuerzas.

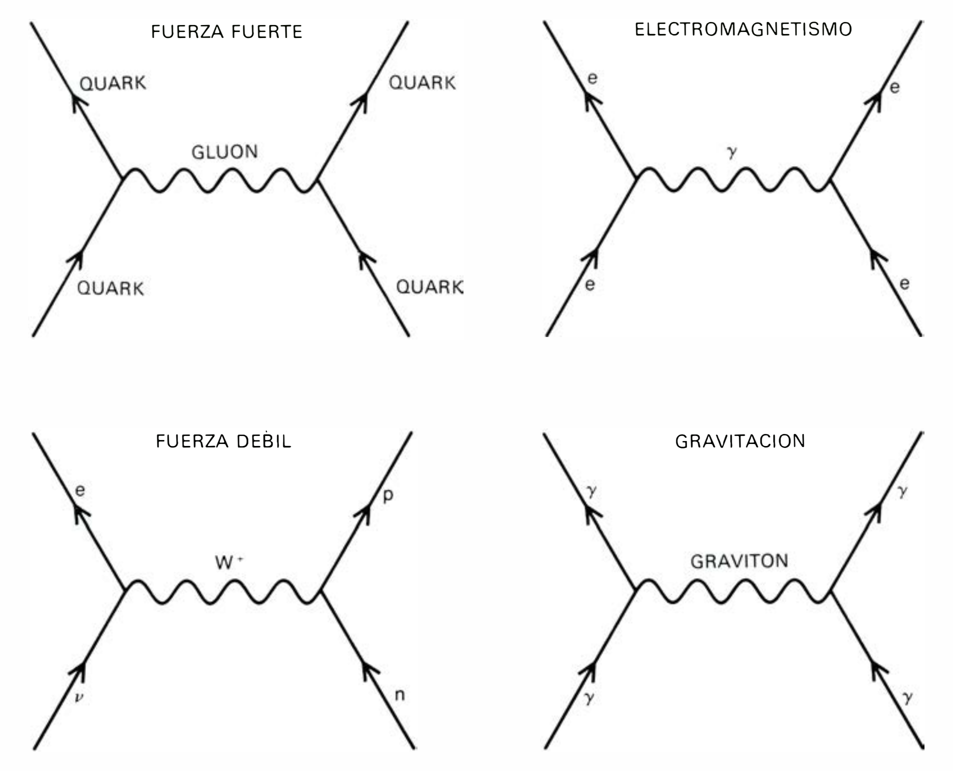
No se ha probado experimentalmente la supergravedad. Se trata aún de una teoría especulativa, pero el progreso realizado hasta ahora resulta estimulante. Por reunir algunos de los conceptos más fundamentales de la física moderna, la supergravedad ya ha logrado más que cualquier otra teoría cuántica de la gravitación anterior.

La comprensión actual de las leyes fundamentales de la naturaleza surgió de tres principios: relatividad especial, relatividad general y mecánica cuántica. Cada uno de ellos resolvió una dificultad experimental o teórica, y cada uno predijo nuevos fenómenos que luego fueron verificados experimentalmente. No se puede dudar ya seriamente de su validez.

Einstein propuso la teoría especial de la relatividad a fin de reconciliar el concepto de movimiento en el marco de la mecánica newtoniana con el hallazgo experimental de que la velocidad de la luz es constante para todos los observadores. Si las ondas luminosas se comportasen de la misma manera que las ondas de la superficie del agua, un observador en movimiento con respecto a las ondas mediría una velocidad de onda diferente de la medida por un observador en reposo. Las ecuaciones de Maxwell parecían predecir que la velocidad de la luz no dependía del movimiento de un observador, y dado que esta predicción contradecía el sentido común, se supuso que las ecuaciones de Maxwell sólo eran válidas para observadores en reposo. En 1888, el experimento de A. A. Michelson y E. W. Morley mostró que esta suposición era falsa. Y fue el genio de Einstein quien percibió que la elegante forma de las ecuaciones de Maxwell era más importante que la visión newtoniana, o de sentido común del movimiento. Mostró que las ecuaciones de Maxwell son válidas para cualquier observador si las escalas de longitud y tiempo, empleadas por dos observadores cualesquiera, dependen intrínsecamente de su velocidad relativa. Luego mostró que las leyes de la mecánica newtoniana podían modificarse de suerte que incorporasen los nuevos conceptos de espacio y tiempo. Una predicción importante es que la velocidad de la luz es la máxima velocidad permitida para cualquier partícula o señal. Otra predicción, conocida por todos, es la relación entre la energía y la masa de una partícula, $E = mc^2$, fórmula que determina la energía liberada en las reacciones nucleares.

La teoría general de la relatividad fue propuesta por Einstein en 1916, tras nueve años de forcejeo con el problema de la formulación de una teoría de la gravitación que estuviese de acuerdo con la simetría espacio-tiempo de la relatividad especial y con la observación experimental, conocida desde Galileo, de que todos los cuerpos, independientemente de su masa, siguen la misma trayectoria en el campo gravitatorio. Por su contenido conceptual y por el aliento de penetración creativa que exige, la relatividad general es un logro de la inte-

LAS TEORIAS CUANTICAS DE CAMPOS explican las fuerzas que actúan sobre una partícula en función de otras partículas que pueden emitirse o absorberse. Estos sucesos se representan gráficamente mediante vértices. En el vértice básico de la electrodinámica cuántica, las líneas que representan un electrón (e^-) o un positrón (e^+) intersecan una tercera línea que representa un fotón (γ). El vértice puede interpretarse de tres maneras, dependiendo de las direcciones en que se muevan las distintas partículas. Un electrón y un positrón se aniquilan mutuamente dando un fotón *(izquierda)*; un fotón se desintegra en un electrón y un positrón *(centro)*; o un electrón se desintegra en un fotón y otro electrón *(derecha)*. La creación y aniquilación de partículas y antipartículas es el proceso que distingue las teorías cuánticas de las "clásicas" de campos.



LAS INTERACCIONES ENTRE LAS PARTICULAS pueden representarse gráficamente mediante diagramas en los que dos vértices estén unidos. La fuerza entre las dos partículas se transmite mediante el intercambio de una tercera partícula, a la que se le llama virtual porque no puede detectarse. Cada una de las cuatro fuerzas de la naturaleza tiene sus propias partículas virtuales o cuanta. El cuanto de la fuerza electromagnética es el fotón. Las interacciones fuertes entre los quarks (los supuestos constituyentes de protones y neutrones) son mediadas por las partículas llamadas gluones. La interacción débil se transmite por partículas (W^+, W^- y Z^0), de las que se piensa que son exactamente igual al fotón, salvo que tienen una masa grande. El cuanto de la gravitación es el gravitón, que carece de masa. De todos estos cuanta de intercambio, sólo se ha observado, hasta el momento presente, el fotón, pero se confía en que los otros también existan.

ligencia humana que anonada. Hablando de una forma imprecisa, Einstein razonó así: en primer lugar, si las trayectorias de los cuerpos que caen son independientes de su masa, la gravitación debe estar relacionada con la estructura intrínseca del espacio y del tiempo. Después derivó las ecuaciones que expresan esta idea matemáticamente, acercándose a los métodos de la geometría no-euclídea formulada un siglo antes por Carl Friedrich Gauss y Bernhard Riemann. La teoría resultante predecía que la curvatura hacia el sol de la luz estelar, que pasa cerca del borde solar, sería el doble de la que Newton hubiese predicho. Einstein sugirió que se midiese este efecto durante un eclipse solar total. Los resultados de una expedición dirigida por A. S. Eddington fueron anunciados en el primer aniversario del armisticio de la Primera Guerra Mundial. Fue un momento dramático y sublime en la historia de la ciencia. El profundo razonamiento teórico de Einstein había encontrado confirmación en el laboratorio definitivo de la naturaleza.

Años después de la formulación de la relatividad general, escribía Einstein: "A la luz del conocimiento obtenido, el feliz logro parece casi algo natural, que cualquier estudiante inteligente puede dominar sin demasiado esfuerzo. Pero los años de búsqueda ansiosa en la oscuridad, con sus anhelos intensos, los vaivenes continuos de un estado de confianza a otro de postración y la salida final a la luz, sólo pueden entenderlos aquellos que lo han experimentado". Sus palabras se aplican con igual justeza a otros descubrimientos revolucionarios de la física.

La mecánica cuántica, que fue desarrollada en 1926 por Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y otros, dio una explicación satisfactoria de las líneas discretas del espectro atómico. La mecánica cuántica no describe los electrones de los átomos como partículas puntuales sino como superposición de ondas, que puede interpretarse como una distribución de probabilidad alrededor del núcleo. La energía de cada distribución tiene un valor definido y se emite una radiación de frecuencia fija cuando un electrón salta de un estado cuántico a otro. El determinismo estricto de la mecánica clásica se abandona en la teoría cuántica y se reemplaza por una interpretación probabilística de las mediciones a nivel microscópico. Por ejemplo, un electrón de un átomo puede estar en cualquier lugar alrededor del núcleo; la probabilidad de encontrarlo, en un punto dado cualquiera, está relacionada con la amplitud de la distribución de onda en ese punto.

Si había de construirse la física teórica moderna sobre los cimientos de la relatividad especial y de la mecánica cuántica, era esencial unir las dos teorías. El primer gran avance se debió a P. A. M. Dirac, quien formuló una ecuación de ondas cuanticorrelativista para el electrón, en 1928. Del trabajo de Dirac surgió una predicción sorprendente. Su ecuación era consistente sólo si existía una nueva partícula dotada de la misma masa que el electrón, pero con carga eléctrica opuesta. Esta antipartícula del electrón, llamada positrón, se descubrió en 1932. Hoy se admite que existe una antipartícula por cada partícula natural.

Con el desarrollo de la teoría cuántica de campos, que comenzó con el trabajo de Dirac, Heisenberg y Wolfgang Pauli en las postrimerías de los años veinte, advino una unificación completa de la relatividad especial y la mecánica cuántica. La teoría cuántica de campos es un formalismo general que, en principio, puede aplicarse a cada una de las cuatro fuerzas. En la práctica, sin embargo, surgen dificultades por los infinitos que aparecen en el cálculo de algunas contribuciones cuánticas a las probabilidades. Estas dificultades se vencieron primero en electrodinámica cuántica, que es la teoría cuántica de campos que describe las interacciones electromagnéticas de los electrones, positrones y fotones. El éxito llegó a finales de los años cuarenta, dos décadas después de la formulación de la teoría, cuando Richard P. Feynman, Julian S. Schwinger y Sinitiro Tomonaga desarrollaron métodos de cálculo más sencillos, en estrecha armonía con las simetrías subyacentes de la teoría. Se encontró que, por medio de un método denominado de renormalización, los infinitos podían sustraerse sin ambigüedades. Las predicciones finitas obtenidas se podían comparar entonces con el experimento. Las predicciones de electrodinámica cuántica se confirman con extraordinaria precisión. Por ejemplo, la teoría predice que el electrón actúa como un minúsculo imán. El valor medido del momento magnético del electrón es $1{,}0011596524 \pm 0{,}0000000002\mu$, que está de acuerdo con la predicción teórica en un orden de 1 en 10^{10}.

El procedimiento de renormalización puede aplicarse tan sólo a una clase particular de teorías cuánticas de campos, aquéllas en que los infinitos pueden ser compensados por la corrección de los parámetros básicos de la teoría, como la masa y la carga del electrón. La masa observada del electrón es la suma de la masa "desnuda" y la "autoenergía" resultante de la interacción del electrón con su propio campo electromagnético. Sólo es observable la suma de los dos términos. La autoenergía puede calcularse y resulta ser infinita. Pero como no se conoce nada acerca de la masa desnuda, se le puede asignar un valor infinito negativo; con ello resulta que los dos infinitos se cancelan entre sí, obteniéndose la masa finita observada del electrón.

La renormalización funciona en la electrodinámica cuántica y en las teorías de campos, aceptadas comúnmente, construidas para describir interacciones fuertes. Durante muchos años, pareció que no existía una teoría renormalizable convincente de las interacciones débiles. Esta situación cambió a comienzos de los setenta con el descubrimiento teórico hecho por Gerard 't Hooft y Martin J.G. Veltman, de la Universidad de Utrecht, descubrimiento que fue ulteriormente desarrollado por ellos mismos, por el desaparecido Benjamin W. Lee, del Fermi National Accelerator Laboratory, y por J. Zinn-Justin, del Centro de Investigación Nuclear de Saclay, en los aledaños de París. Demostraron que las teorías de campos que unifican las interacciones débiles y electromagnéticas pueden renormalizarse. Las teorías cuánticas de la gravitación tienen, todavía, serias dificultades con los infinitos. Y aquí es donde la supergravedad ofrece nuevas esperanzas.

En teoría cuántica de campos, las partículas se identifican con las ondas o los cuanta de los campos fundamentales. Una predicción importante de la teoría cuántica de campos es que las partículas giran alrededor de un eje. El momento angular intrínseco (espín) puede tomar sólo valores que sean múltiplos enteros o semienteros de la constante de Planck. El mesón π, de vida corta, tiene un espín igual a 0, el electrón, protón y neutrón tienen un espín 1/2 y el fotón un espín 1.

Una predicción general de la teoría cuántica de campos, que se confirma de una manera sorprendente en la naturaleza, es la conexión entre el espín de una partícula y su estadística, es decir, el comportamiento de un sistema formado por dos o más partículas idénticas. Las partículas con espín semientero (verbigracia, 1/2, 3/2, 5/2) son fermiones y obedecen el principio de exclusión formulado por Pauli, que afirma que dos fermiones idénticos no pueden ocupar el mismo punto en el espacio o, de un modo más general, el mismo estado cuántico. Esta propiedad de los fermiones explica

la estructura de las capas electrónicas de los átomos y, en consecuencia, las distintas propiedades químicas de los elementos. Si no fuese por el principio de exclusión, todos los electrones de un átomo se concentrarían en el estado de energía más bajo. Para masas grandes de densidad elevada, el mismo principio conduce a una fuerza efectiva de carácter repulsivo entre los fermiones idénticos. Esta fuerza explica la estabilidad de las estrellas enanas blancas y de las estrellas de neutrones, estrellas abocadas a colapsar en agujeros negros, bajo la fuerza atractiva gravitatoria, de no ser por lo anterior.

Para partículas dotadas de espín entero, los bosones, la estadística es completamente distinta. La probabilidad de ocupar el mismo punto en el espacio o el mismo estado cuántico, para dos o más bosones, crece. Tales superposiciones de muchos bosones idénticos pueden conducir a efectos macroscópicamente observables. Por ejemplo, la luz del láser es una superposición de muchos fotones con la misma energía y dirección. Dadas las propiedades dispares de bosones y fermiones, resulta muy notable que se haya podido encontrar una simetría que los relacione.

En teoría cuántica de campos, todas las fuerzas entre partículas se describen por un intercambio de partículas "virtuales". La fuerza repulsiva, entre dos electrones, se presenta cuando un electrón emite un fotón el cual es absorbido luego por el otro electrón. Se dice que el fotón intermedio es virtual, porque no puede observarse directamente en este proceso; existe por un tiempo demasiado corto. Se puede probar, en teoría cuántica de campos, que las fuerzas de largo alcance provienen del intercambio de partículas sin masa y, las de corto alcance, del intercambio de partículas con masa. La fuerza nuclear de corto alcance entre dos protones procede del intercambio de mesones pi, cuya masa es 300 veces la del electrón. A un nivel más fundamental, se cree que el protón, el neutrón y el mesón pi están formados por quarks. Desde este punto de vista, la interacción fuerte proviene del intercambio, por los quarks, de partículas virtuales llamadas gluones. La interacción débil se cree que procede del intercambio de los bosones vectoriales intermedios, que son partículas de espín 1, muy pesadas y predichas por las teorías de campos que unifican las interacciones débiles y las electromagnéticas.

Aunque queda todavía por establecer una teoría satisfactoria de la gravitación cuántica, se puede anticipar que la fuerza newtoniana provendrá del intercambio de una partícula virtual. Esta partícula recibe el nombre de gravitón. Ha de ser sin masa porque la gravedad es una fuerza de largo alcance. Su espín ha de ser un entero par, como 0, 2, 4, porque se puede demostrar que el intercambio de bosones cuyo espín es un entero impar da lugar a fuerzas repulsivas entre las partículas. El espín no puede ser cero porque entonces la luz no se curvaría hacia el sol. El siguiente caso más sencillo, correspondiente al espín igual a 2, satisface todas las pruebas experimentales.

Los argumentos del párrafo precedente pueden invertirse, esto es, la teoría general de la relatividad puede deducirse a partir de la suposición de que la fuerza gravitatoria procede del intercambio de partículas sin masa de espín 2 y que estas partículas son descritas por una teoría cuántica de campos. Todas las partículas se atraen por medio de gravitones virtuales, de suerte que siguen las trayectorias curvas predichas por las ecuaciones de Einstein. Esta nueva derivación de la relatividad general no mengua el descubrimiento de Einstein. Simplemente lo ilumina desde el nuevo punto de vista de las fuerzas en el marco de la teoría cuántica de campos.

La diferencia fundamental entre la teoría clásica de campos y la teoría cuántica de campos es que únicamente en la última puede crearse y destruirse las partículas. La aniquilación de un electrón y un positrón dando dos fotones sólo es posible en teoría cuántica de campos. Puesto que el proceso se observa frecuentemente en el laboratorio, no hay duda que este aspecto de la teoría cuántica de campos es correcto. En efecto, la predicción de la probabilidad de este suceso en electrodinámica cuántica está en completo acuerdo con la experimentación.

El elemento básico de la teoría cuántica de campos es el "vértice", en el que una partícula se desintegra para dar dos o más partículas. Se denomina vértice en electrodinámica cuántica a la intersección entre dos líneas que representan electrones o positrones y una línea que representa un fotón. El vértice puede describir la creación de un par electrón-positrón a partir de la desintegración de un fotón, la aniquilación de un par electrón-positrón creando un fotón, o la desintegración de un electrón en un segundo electrón y un fotón.

FUERZA	INTENSIDAD	RANGO	PARTICULAS SOBRE LAS QUE ACTUA	PARTICULAS INTERCAMBIADAS	MASA DE PARTICULAS INTERCAMBIADAS	ESPIN DE PARTICULAS INTERCAMBIADAS	NATURALEZA DE LA FUERZA ENTRE PARTICULAS IDENTICAS
FUERTE	1	CORTO	QUARKS	GLUONES	?	1	REPULSIVA
ELECTROMAGNETICA	10^{-2}	LARGO	PARTICULAS CARGADAS ELECTRICAMENTE	FOTONES	0	1	REPULSIVA
DEBIL	10^{-5}	CORTO	ELECTRONES, NEUTRINOS Y QUARKS	BOSONES VECTORIALES INTERMEDIOS (W^+, W^-, Z^0)	50-100 GeV	1	REPULSIVA
GRAVITATORIA	10^{-39}	LARGO	TODAS LAS PARTICULAS	GRAVITONES	0	2	ATRACTIVA

EL CARACTER DE LAS CUATRO FUERZAS viene determinado principalmente por las propiedades de los cuanta asociados. La masa de la partícula intercambiada determina el rango de la fuerza; tan sólo las fuerzas transmitidas por partículas sin masa tienen largo alcance. El momento angular intrínseco (espín) ejerce un influjo importante también. Las fuerzas transmitidas por partículas cuyo espín es un entero par son invariablemente atractivas; los cuanta con espín entero impar dan lugar a fuerzas repulsivas entre partículas semejantes. Aunque la gravitación es muy débil, sólo ella es de largo alcance y atractiva entre todo par de partículas, determinando la estructura del universo a gran escala.

La probabilidad para cualquier proceso en teoría cuántica de campos se obtiene construyendo diagramas en los que los vértices se hallan conectados de todas las maneras posibles. Para la dispersión de un electrón por otro, el diagrama más sencillo muestra el intercambio de un solo fotón, que representa los efectos de la fuerza electromagnética clásica. Otros diagramas tienen ciclos cerrados de partículas virtuales. Los diagramas de ciclos representan las correcciones cuánticas a la ley clásica de la fuerza. Por cada diagrama existe una expresión bien definida, si bien matemáticamente complicada. En teorías cuánticas de campos afortunadas, se puede evaluar estas expresiones y sustraer los infinitos que suelen evidenciar, mediante renormalización. La probabilidad, por lo que respecta al proceso, se obtiene entonces sumando las amplitudes para todos los diagramas y elevando al cuadrado la suma. Como existe un número infinito de diagramas se hace imposible alcanzar un resultado exacto. En electrodinámica cuántica, la contribución de los diagramas con un ciclo es menor que la contribución de los diagramas sin ciclos, en un factor inferior al uno por cien. La aportación de los diagramas con dos ciclos lo será con un factor adicional de un uno por cien, y así sucesivamente. De aquí que se pueda obtener una buena aproximación de la amplitud total considerando sólo unos cuantos diagramas.

A lo largo de la historia, las normas decorativas de muchas culturas dan testimonio de la gran atracción que la simetría ha ejercido siempre en la humanidad. Puede entenderse la simetría como un movimiento que deja invariante la forma de un diseño o un objeto. Por ejemplo, un cubo es invariante si lo giramos 90 grados, y una esfera es invariante bajo cualquier rotación alrededor de un eje que pase por el centro. Las teorías físicas pueden tener simetrías análogas, pero lo que permanece invariante bajo una transformación no es un dibujo o un objeto, sino las leyes matemáticas de la teoría. Los físicos están hoy convencidos de que las simetrías desempeñan un papel vital en nuestra comprensión de la naturaleza.

Como ejemplo de simetría fundamental, consideremos dos astronautas que estudien fenómenos electromagnéticos desde dos naves espaciales que se muevan libremente en una región interestelar, en donde tuvieran una velocidad relativa constante. Cada astronauta define un sistema de coordenadas con origen en su propia posición y con orientación diferente. Por tanto, los dos astronautas identifican los sucesos externos por medio de diferentes coordenadas, y los registros de sus observaciones parecerían completamente diferentes. Sin embargo, si reducen sus hallazgos a leyes físicas, ambos descubrirían la validez de las ecuaciones de Maxwell.

El principio demostrado en el experimento anterior se llama invariancia de Poincaré, en honor del matemático francés Henri Poincaré. Se trata de la simetría espacio-tiempo que subyace en la teoría especial de la relatividad. La comparación de las observaciones hechas por los dos astronautas mostraría que los sistemas de coordenadas están relacionados de la forma exigida en el marco de la relatividad especial. La invariancia de Poincaré es la afirmación explícita de la suposición, verificada experimentalmente, de que las leyes de la naturaleza son las mismas en todas partes. De una manera más precisa, afirma que todas las leyes de la física tienen la misma forma en cualquier par de sistemas de coordenadas, aun cuando estén desplazados, girados y moviéndose uno con respecto al otro, con tal de que la velocidad relativa sea constante.

Existe una distinción vital entre simetrías como ésta, calificadas de globales, y las simetrías locales. La simetría global puede parecer un concepto más amplio, aunque las simetrías locales imponen exigencias más estrictas en las teorías y revelan uniones más profundas en la naturaleza. En efecto, la transición de una simetría global a otra local describe el origen de las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas y existen razones para sospechar que las demás fuerzas surgen también de simetrías locales.

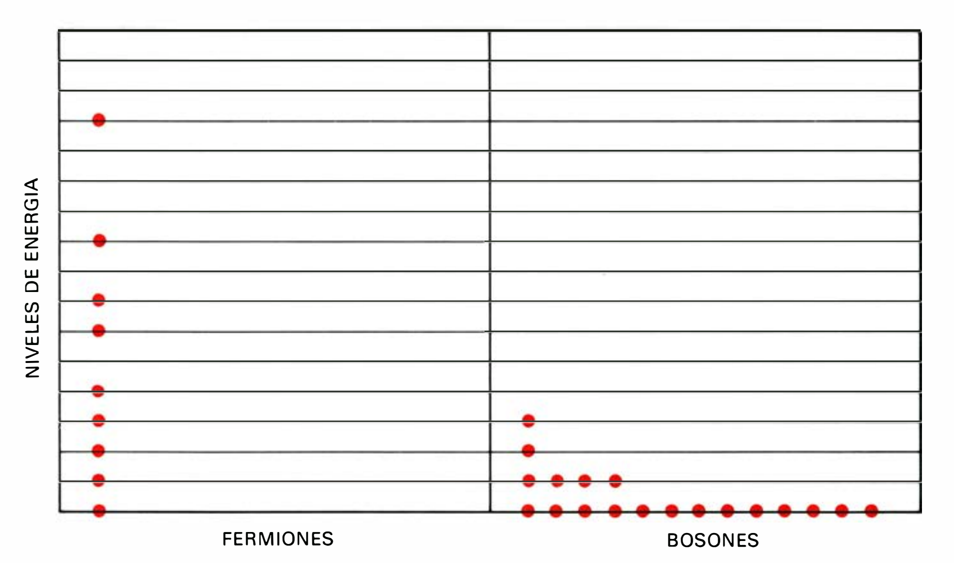
Una simetría global es aquella en la que una transformación se aplica uniformemente a todos los puntos del espacio; en una simetría local, cada punto se transforma independientemente. La distinción puede ilustrarse por medio de un globo esférico con varios puntos señalados sobre su superficie. Si se elige un eje que pasa por el centro de la esfera, se puede girar el globo en un cierto ángulo. Por conservar el globo su forma esférica, la rotación es una operación de simetría del globo; y porque todos los puntos de la superficie se transforman de la misma manera (rotación con el mismo ángulo), es una operación de simetría global.

Con un globo ideal también se podría mover cada punto independientemente, empujando o atrayendo los puntos a nuevas posiciones en la superficie, pero conservando sus distancias al centro fijo. La esfera sigue manteniendo su forma, por lo que este procedimiento es, a su vez, una operación de simetría. Cada punto se transforma independientemente de sus vecinos, luego es una simetría local. Asistimos, no obstante, a un cambio de importancia: cuando los puntos se mueven independientemente, la membrana del globo se estira y se desarrollan fuerzas elásticas entre los puntos desplazados. Estas fuerzas no resultan de un modelo imperfecto; al contrario, las fuerzas aparecen de idéntica manera cuando una teoría física tiene una simetría local.

La invariancia de Poincaré, considerada más arriba, es una simetría global, porque una transformación entre los dos conjuntos de coordenadas empleados para describir un punto dado en el espacio-tiempo es la misma para todos los puntos. Se establece la imposición más fuerte de invariancia local de Poincaré al exigir que las leyes de la física conserven la misma forma cuando las coordenadas de cada punto se transforman independientemente. Este cambio equivale a permitir que los observadores tengan movimiento acelerado uno con respecto al otro. A priori, parecería que los observadores, bajo tales circunstancias, no habrían de deducir las mismas leyes físicas porque un observador en estado de aceleración experimentaría fuerzas "ficticias", como la fuerza centrífuga del movimiento de rotación. Einstein advirtió que las fuerzas ficticias inducidas por la aceleración están íntimamente relacionadas con las fuerzas gravitatorias asociadas a las masas. Mostró que las leyes de la física pueden permanecer invariantes si se introduce el campo gravitatorio en las ecuaciones. El resultado es la teoría general de la relatividad.

El ejemplo anterior ilustra un vigoroso rasgo general de la relación entre simetrías globales y locales. Si un conjunto de leyes físicas es invariante bajo alguna simetría global, se puede conseguir la exigencia más fuerte de invariancia bajo simetría local sólo mediante la introducción de nuevos campos, que originarán nuevas fuerzas. Los campos se llaman campos gauge, los cuales están asociados a nuevas partículas cuyo intercambio da lugar a las correspondientes fuerzas. Así pues, la gravitación es el campo gauge de invariancia local de Poincaré, y la fuerza gravitatoria resulta de exigir que la simetría de Poincaré sea local.

La existencia de las fuerzas electromagnéticas puede derivarse también de la exigencia de simetría local. En teoría cuántica de campos, las partículas cargadas se describen por campos que tienen



EL MOMENTO ANGULAR INTRINSECO DE ESPIN no sólo afecta a la dinámica de las partículas sino también al comportamiento estadístico de los sistemas formados por dos o más partículas idénticas. A las partículas cuyo espín es semientero (así el electrón y el protón) se les llama fermiones. Obedecen el principio de exclusión de Wolfgang Pauli, que dice que dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado mecanocuántico. Las partículas con espín entero (tales como el fotón y el gravitón) reciben el nombre de bosones; pueden reunirse en un número ilimitado en un punto o en un mismo estado mecanocuántico de energía. De aquí que, en cualquier sistema con un espectro de estados de energía, los fermiones se distribuyan uno en cada estado, mientras que los bosones tiendan a concentrarse en el estado de energía más bajo posible, como indica claramente la figura.

dos números en cada punto del espacio-tiempo: una amplitud y una fase. La amplitud mide la probabilidad de encontrar una partícula en un punto y la fase describe las propiedades de onda de la partícula. Las cantidades observables, verbigracia la energía total de un conjunto de partículas cargadas, no cambia cuando la fase del campo se desplaza en una cantidad que es constante para todos los puntos. Por tanto, el campo tiene una simetría global bajo un cambio de fase. La simetría local requeriría que las cantidades observables permanecieran invariantes al permitir que la fase variase independientemente en cada punto. Para acomodar la simetría local es necesario introducir el campo electromagnético como un campo gauge; los cuanta de este campo son los fotones, que dan lugar a la fuerza electromagnética. Con sólo simetría global no habría fuerzas electromagnéticas entre partículas cargadas, ni fotones, ni luz.

La simetría local electromagnética es una simetría interna; contrariamente a la invariancia de Poincaré, no implica un cambio en las coordenadas espaciotemporales. Otra simetría interna, la llamada simetría isotópica, es fundamental en física nuclear, ya que establece una relación entre el protón y el neutrón.

El protón y el neutrón tienen ambos espín 1/2, y experimentan las fuerzas nucleares con una intensidad aproximadamente igual. La simetría isotópica permite considerar a ambos como dos estados alternativos de una sola partícula, el nucleón. Se puede imaginar el nucleón como una partícula con una flecha en un espacio imaginario. Si la flecha apunta hacia arriba, se dice que la partícula es un protón; si apunta hacia abajo, un neutrón. Las partículas físicas tienen siempre la flecha apuntando hacia arriba o hacia abajo (no existen partículas reales que sean mitad protón y mitad neutrón) y las ecuaciones que describen la fuerza nuclear son invariantes bajo las rotaciones arbitrarias de la flecha. En física nuclear, la simetría isotópica es una simetría global. La flecha debe girar el mismo ángulo en todos los puntos si las fuerzas nucleares han de ser invariantes.

El problema que suponía extender la simetría isotópica de una simetría global a otra local fue resuelto en 1954 por C. N. Yang y Robert Mills. Hallaron que la transición a una simetría local exigía la introducción de tres campos gauge; cada campo estaría asociado a una partícula, sin masa, y de espín 1. A lo largo de más de diez años, la teoría de campos propuesta por Yang y Mills se consideró como una elegante curiosidad matemática sin aplicaciones físicas. Las tres partículas sin masa y las fuerzas de largo alcance que generarían no existían sencillamente.

Ahora se sabe que las partículas gauge de la teoría de campos de Yang-Mills pueden existir, porque no han de carecer forzosamente de masa. Pueden adquirir una masa –una masa realmente notable– a través de un mecanismo llamado de ruptura espontánea de simetría. Jeffrey Goldstone, de la Universidad de Cambridge, demostró que las manifestaciones físicas de una teoría simétrica física pueden ser a veces completamente asimétricas. Una analogía de este proceso es la rueda de la ruleta: las ecuaciones de movimiento para la bola y la rueda son simétricas respecto a giros alrededor del eje de rotación, pero la bola llega al reposo, invariablemente, en una posición asimétrica.

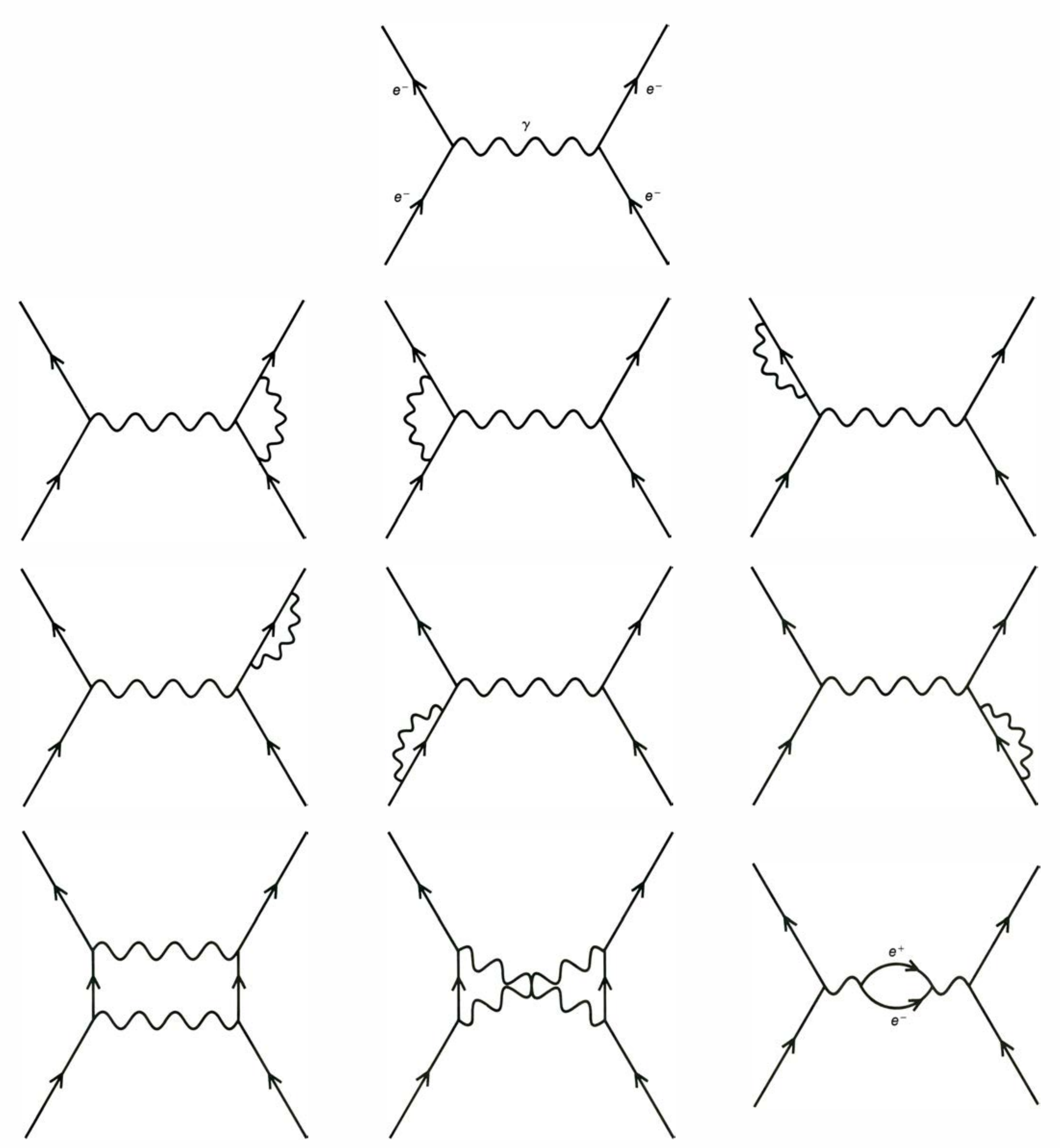
Posteriormente, Peter Higgs, de la Universidad de Edimburgo, demostró que en una teoría de campos gauge el efecto de ruptura espontánea de simetrías es el de dar masa a algunas de las partículas gauge, mientras otras podrían permanecer sin masa. Se construyeron entonces las teorías unificadas de las interacciones débiles y electromagnéticas que incorporan simetría isotópica y ruptura espontánea. En estas teorías, los portadores de la fuerza débil, de corto alcance, son los bosones vectoriales intermedios. Son partículas gauge de espín 1, que adquieren masa por medio del mecanismo de Higgs. El fotón es una partícula gauge que permanece sin masa. Por tanto, la simple exigencia de invariancia local isotópica condujo a la unificación de dos de las fuerzas básicas de la naturaleza. Como se demostrará más adelante, la exigencia adicional de supersimetría local puede unificar además estas fuerzas con la gravitación.

Las simetrías internas, la simetría isotópica por ejemplo, relacionan partículas que tienen el mismo espín. Uno de los sueños de los físicos teóricos ha sido el de encontrar esquemas de simetrías capaces de unir partículas dotadas de distinto espín. Este sueño se hizo realidad con la invención de la supersimetría; ésta relaciona partículas con espines contiguos, como 1 y 1/2, y abarca, en consecuencia, por necesidad, a fermiones y bosones. Y lo que es igualmente notable, relaciona las simetrías internas con la invariancia de Poincaré. Esta conexión es la que permite construir la nueva teoría de gravitación, la supergravedad.

La supersimetría fue formulada, independientemente, por físicos de la Unión Soviética, Europa occidental y Estados Unidos. En 1971, fue discutida por Y. A. Golfand y E. P. Likhtman, del Instituto Lebedev de Física de Moscú. Sin embargo, su trabajo pasó inadvertido, y el tema sería redescubierto en 1973

por D. V. Volkov y V. P. Akulov, del Instituto Físico-Técnico de Kharkov. Pierre M. Ramond, del Instituto de Tecnología de California, y André Neveu, de la Escuela Normal Superior de París, y John H. Schwarz, del Instituto de Tecnología de California, hallaron, también en 1971, una simetría entre bosones y fermiones. Sus trabajos tuvieron como origen un tratamiento de las partículas físicas llamado de modelos duales. En 1973, Julius Wess, de la Universidad de Karlsruhe, y Bruno Zumino, de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), generalizaron este trabajo a la teoría cuántica de campos y dieron un procedimiento sistemático para la construcción de teorías supersimétricas globales.

Hacia la mitad de los años sesenta, se habían probado teoremas de cuya de-



CORRECCIONES CUANTICAS a las leyes clásicas de fuerzas; se representan aquí por diagramas que tienen ciclos cerrados. En la interacción entre dos electrones, el intercambio de un solo fotón virtual *(arriba)* corresponde a la fuerza predicha por la teoría electromagnética de Maxwell. En electrodinámica cuántica se han de considerar interacciones más complicadas. Por ejemplo, un fotón puede emitirse y luego absorberse por el mismo electrón, se pueden intercambiar dos fotones, o el fotón virtual puede dar lugar a un electrón y un positrón, que después se aniquilan mutuamente para dar otro fotón. Un problema de hace mucho tiempo, en teoría cuántica de campos, es que los diagramas con ciclos predicen una probabilidad infinita de interacción. En electrodinámica cuántica un procedimiento llamado renormalización elimina los infinitos. La dificultad de una teoría cuántica de la gravitación es que el procedimiento de renormalización no es eficaz y algunos infinitos permanecen.

mostración parecía deducirse la imposibilidad de unificar la invariancia Poincaré y la simetría interna. Hoy, tales teoremas "negativos" resultan incorrectos. Sin embargo, el error no estaba en la prueba, sino en una de las hipótesis implícitas en los teoremas, que resultó ser demasiado restrictiva y que podía debilitarse. La hipótesis, que parecía plausible y común, sostenía que los números que se empleaban en describir la simetría debían obedecer la ley conmutativa de la multiplicación. Se sabe ya que esta limitación no es obligatoria. La teoría de supersimetría incorpora, como esencial, elementos numéricos que no tienen la propiedad conmutativa.

La ley conmutativa para la multiplicación dice que el producto de dos números no depende del orden en que son multiplicados. Luego si r_1 y r_2 representan cualquier par de números reales, entonces $(r_1 \times r_2) - (r_2 \times r_1) = 0$. Por ejemplo, $(6 \times 2) - (2 \times 6) = 0$. Para números anticonmutantes, el signo de esta ecuación se cambia. Si se supone que ϵ_1 y ϵ_2 son dos números anticonmutantes, entonces $(\epsilon_1 \times \epsilon_2) + (\epsilon_2 \times \epsilon_1) = 0$. Aunque no se pueden sustituir valores numéricos en esta ecuación, sí cabe imaginar que existan números nuevos con esta propiedad. Tales números fueron inventados hace más de un siglo por Hermann Günther Grassman, que fue profesor de matemáticas en la ciudad alemana de Stettin.

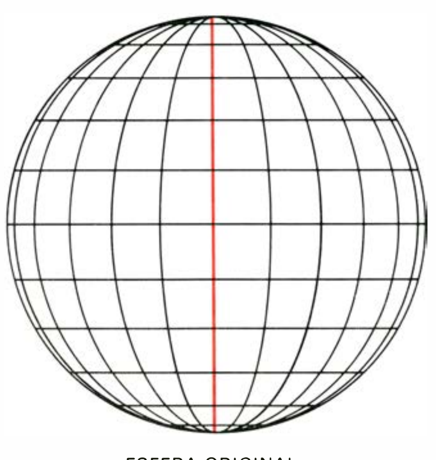
Podemos describir la supersimetría remedando lo que hicimos con la simetría isotópica; es decir, dotaremos a una hipotética "superpartícula" de una flecha extra en un espacio auxiliar imaginario. Si la flecha apunta hacia arriba, la partícula es un fermión; si señala hacia abajo, es un bosón. Los espines del fermión y del bosón son siempre contiguos. Por ejemplo, un bosón con un espín 1 puede unirse a un fermión cuyo espín es 1/2 o 3/2. Para partículas físicas, la flecha debe apuntar siempre hacia arriba o hacia abajo, puesto que no existen partículas reales que sean mitad bosón y mitad fermión, y las ecuaciones que describen las fuerzas entre las partículas elementales son invariantes bajo las rotaciones arbitrarias de la flecha, exactamente como lo son en la simetría isotópica. La supersimetría es global si el ángulo de rotación es el mismo para todos los puntos del espacio-tiempo, y local si la rotación es distinta en cada punto.

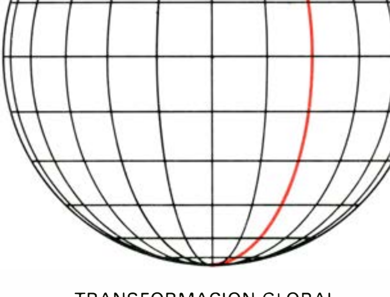
Expliquemos ahora cómo actúa una transformación supersimétrica. Si se denotan los campos bosónicos y fermiónicos por b y f, respectivamente, una transformación los conectará con nuevos campos b' y f', donde $f' = f + b\epsilon$ y $b' = b + f\epsilon$. El factor ϵ es una medida del ángulo de rotación de la flecha de la superpartícula. Aunque b sea un número ordinario, f y ϵ son números anticonmutantes.

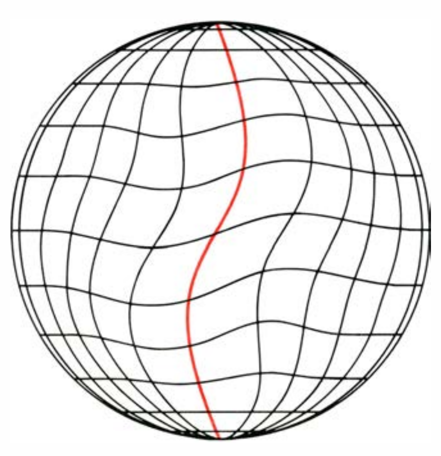
La necesidad de números anticonmutantes en teorías supersimétricas está relacionada con el principio de exclusión de Pauli, regla que prohíbe que dos fermiones ocupen el mismo punto. La probabilidad de encontrar un fermión en un punto está dada por el valor del campo f, y la probabilidad de encontrar 2 fermiones vendrá dada por $f \times f$. El principio de exclusión de Pauli exige que $f \times f = 0$, y los números anticonmutantes tienen precisamente esta propiedad. La probabilidad de encontrar dos bosones en un punto, que es $b \times b$, no necesita anularse y de aquí que b pueda ser un número ordinario. A la ley de rotación supersimétrica se le ha de incorporar también el principio de Pauli. Dos bosones pueden ocupar el mismo punto, pero si ambos se transforman en fermiones mediante una rotación supersimétrica, la probabilidad de encontrarlos en el mismo punto debe ser nula. La probabilidad viene dada por $(f + b\epsilon) \times (f + b\epsilon)$, que ha de anularse. Esta exigencia implica que $(f \times \epsilon) + (\epsilon \times f)$ y que $\epsilon \times \epsilon$ sean nulos.

La propiedad más sorprendente de la supersimetría es la siguiente: la aplicación repetida de la transformación fermión-bosón mueve una partícula de un punto a otro en el espacio-tiempo. Así pues, se obtiene una transformación de Poincaré (de posición) mediante la repetición de una transformación de supersimetría. Dado que la invariancia local de Poincaré es la simetría que origina la relatividad general, se puede esperar asimismo una conexión entre la supersimetría y la gravitación.

Anteriormente se discutió que la transición de una simetría global a otra local







LAS SIMETRIAS pueden estar presentes en las leyes de la naturaleza como lo están en dibujos y objetos tales como los cristales. Así como el cristal mantiene su forma tras una rotación o traslación específica, análogamente una ley simétrica de la naturaleza permanece invariante después de algunas transformaciones específicas. En física, las simetrías son de dos tipos: globales y locales; para plastificar su diferencia imaginemos un globo esférico ideal *(izquierda)*; está señalado con un sistema de coordenadas a fin de que las posiciones de todos los puntos de la superficie puedan identificarse. Aparece una simetría global si se gira la esfera alrededor de algún eje *(centro)*. La rotación es una operación de simetría porque la forma de la esfera permanece invariada; se trata de una simetría global porque las posiciones de todos los puntos de la superficie han sufrido el mismo desplazamiento angular. La simetría local exige que el globo conserve su forma, aun cuando los puntos de la superficie se mueven independientemente *(derecha)*. La simetría local tensa el globo y, por tanto, introduce fuerzas entre los puntos. Cada fuerza básica de la naturaleza procede de una exigencia similar: que una ley de la naturaleza sea invariante bajo una transformación de simetría local.

introduce siempre campos gauge nuevos, que a su vez dan lugar a nuevas fuerzas. Una cuestión obvia a preguntarse será, ahora, si puede extenderse la supersimetría global a invariancia local y, de resultar factible, cuál será la naturaleza de los nuevos campos gauge. La supersimetría local puede darse con tal de introducir dos campos: el campo del gravitón, de espín 2, y un campo nuevo de espín 3/2.

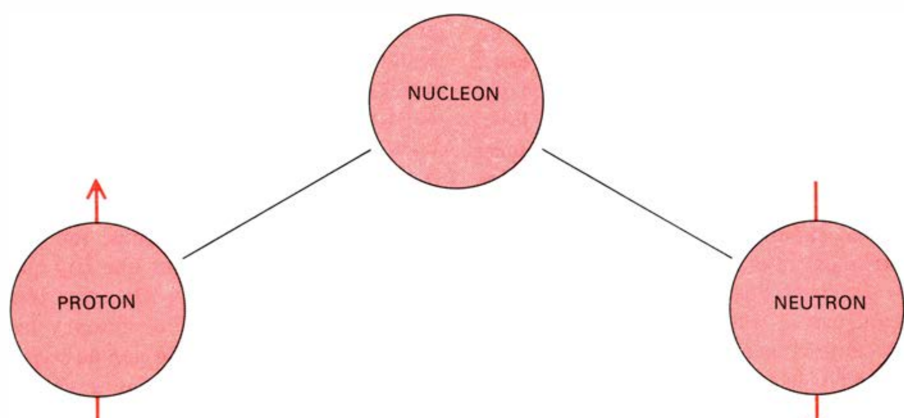
La construcción de una teoría gauge de supersimetría comienza al observar que la repetición de una transformación de supersimetría da lugar a una translación física de una partícula. Esta relación está incorporada en una ecuación que establece que el producto de dos rotaciones supersimétricas es un desplazamiento en el espacio-tiempo. Para obtener una teoría supersimétrica local, se ha de introducir un campo gauge por cada una de las simetrías presentes en la ecuación. El desplazamiento en el espacio-tiempo es una transformación de Poincaré, según la cual el gravitón es una partícula gauge apropiada. De aquí que la gravitación aparezca de manera natural en la teoría, y es por esta razón por la que, a la supersimetría local, se le suele llamar supergravedad. Cuesta más determinar el campo gauge para las transformaciones supersimétricas; ahora bien, como la supersimetría relaciona sólo partículas de espín contiguo, debe ser un fermión con un espín 2 + 1/2 o 2–1/2, es decir, 5/2 o 3/2. Por simplicidad, se elige el espín 3/2, y otras consideraciones ya más técnicas apoyan la misma elección.

En 1976, construimos el ejemplo más elemental de supergravedad en colaboración con Sergio Ferrara, del Laboratorio de Frascati, próximo a Roma. Poco tiempo después, Stanley Deser, de la Universidad de Brandeis, y Zumino mostraron cómo formular la teoría de una manera más sencilla. En nuestra deducción partimos del supuesto de que la teoría debería incluir un gravitón de espín 2 y una partícula de espín 3/2, y que habría de poseer invariancia local de Poincaré y supersimetría local. Tras un largo trabajo matemático, encontramos una teoría que satisfacía tales exigencias.

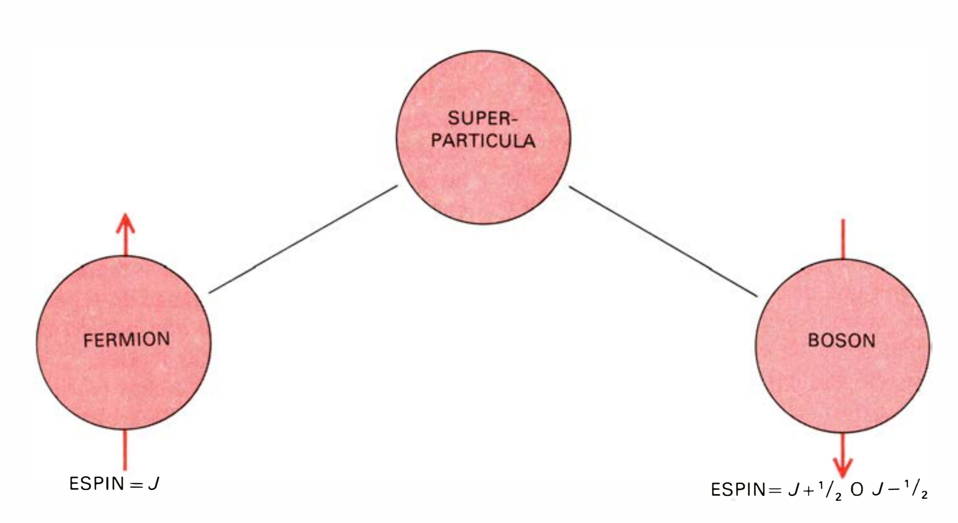
Trabajar con campos que describan partículas de espín elevado se hace notablemente difícil. En 1941, Schwinger y William R. Rarita, del Lawrence Berkeley Laboratory, de la Universidad de California, publicaron una teoría para partículas de espín 3/2, que no interaccionan; no obstante, todos los intentos por introducir fuerzas entre las partículas de espín 3/2 y otras partículas abocaron en incoherencias. Por ejemplo, en algunas de las teorías propuestas, las señales viajarían más rápidamente que la luz, violándose las leyes de la causalidad. Ahora sabemos que esos esfuerzos fracasaron porque las partículas de espín 3/2 sólo pueden acoplarse a otras partículas cuando las fuerzas son supersimétricas.

No se puede eludir, en supergravedad, la existencia de partículas con espín 3/2. Esta partícula acompaña al gravitón, por lo que se ha sugerido el nombre de gravitino para la misma. Falta por esclarecer qué propiedades podrían esperarse del gravitino. En las teorías supergravitatorias más sencillas, no tiene masa y está acoplada a otras partículas sólo por la débil fuerza de la gravitación microscópica. Sería extremadamente difícil detectar tales partículas, razón por la que no han sido observadas todavía. Ni siquiera se han observado experimentalmente aún los gravitones. Sin embargo, en teorías supergravitatorias más complejas, el gravitino puede adquirir una masa a través de la ruptura espontánea de simetría, y pueden aparecer fuerzas más intensas entre el gravitino y otras partículas. En estas teorías, el gravitino sería más fácil de detectar. El descubrimiento de estas partículas de espín 3/2 sería una importante prueba experimental de la supergravedad.

Parte de la dificultad de unir la gra-



LA SIMETRIA ISOTOPICA establece una relación entre las partículas con el mismo espín, el protón y el neutrón, por ejemplo. Ambas partículas pueden observarse como estados de una partícula primitiva o no diferenciada llamada nucleón, a la que se puede concebir asociada con una flecha en un espacio imaginario. Si la flecha apunta hacia arriba, el nucleón es un protón; si apunta hacia abajo, es un neutrón. Para partículas reales, la flecha señala hacia arriba o hacia abajo, puesto que no hay una partícula real que sea la mitad protón y la mitad neutrón. Las leyes de la física que describen interacciones entre protones y neutrones son invariantes bajo rotaciones arbitrarias.



LA SUPERSIMETRIA relaciona partículas con diferentes espines, a saber, aquellas que ostentan espín contiguo al J. es decir, $J + 1/2$ o $J - 1/2$. Así pues, pueden observarse cualquier fermión y bosón con espines contiguos como manifestaciones alternativas de una "superpartícula" única con una flecha en un espacio auxiliar. Tal simetría fundamental entre fermiones y bosones se creyó imposible durante mucho tiempo. En teoría cuántica de campos con supersimetría local, la fuerza gravitatoria aparece de manera natural. El gravitón, de espín 2, tiene un fermión por compañero, de espín 3/2. Para esta partícula se ha sugerido el nombre de gravitino, el cual no ha sido observado.

vitación con las otras tres fuerzas no reside en que las teorías respectivas estén en desacuerdo, sino sencillamente en que tienen demasiado poco en común. En el marco de la relatividad general, las fuerzas se deducen de las propiedades geométricas del espacio y el tiempo, y en teoría cuántica de campos derivan a partir del intercambio de cuanta. La supergravedad describe una relatividad general con el lenguaje de teoría cuántica de campos, pero no hay una razón aparente por la cual la supergravedad no pudiese formularse también en términos geométricos. Esta derivación geométrica parece posible en un espacio-tiempo ampliado, en el que cada punto no tiene solamente las cuatro coordenadas usuales espacio-temporales sino también un conjunto adicional de coordenadas, identificadas por números anticonmutantes. Un "superespacio" de esta clase fue introducido por Akulov y Volkov, e investigado posteriormente por Salam y John Strathdee, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste. Este tratamiento llevó a la construcción de otras teorías supergravitatorias, que precedieron realmente a la que se discute aquí. Richard L. Arnowitt y Pran Nath, de la Northeastern University, desarrollaron una de esas teorías; ellos siguieron los mismos pasos de Einstein, si bien lo hicieron en el superespacio, no en el espacio ordinario. Las teorías del superespacio son elegantes, pero técnicamente complicadas. Aún no se sabe qué partículas describen, ni si son físicamente consistentes.

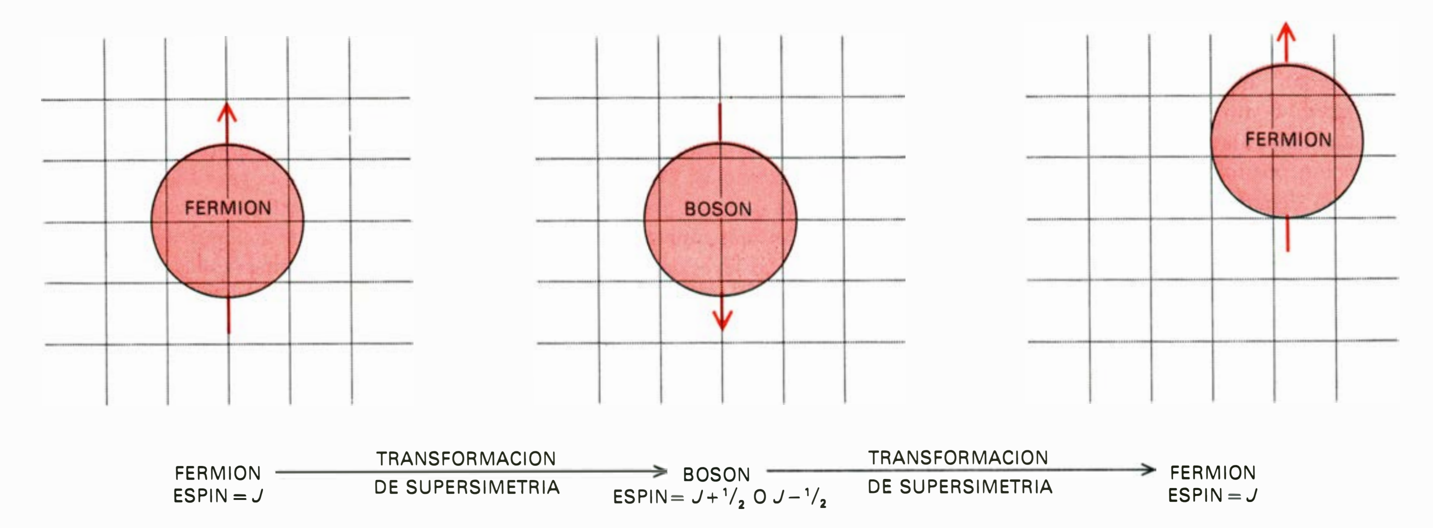
De todas las teorías de supergravitación, la más sencilla es aquella que describe un mundo formado solamente por gravitones y gravitinos. Esto es, evidentemente, irreal, ya que cualquier teoría unificada debe dar cabida a todas las partículas elementales. El número de tales partículas no se conoce de forma precisa. Actualmente se cree que los quarks, que son los bloques de construcción de protones y neutrones, son elementales. Otras partículas que hay que incluir son el electrón y las otras tres partículas relacionadas: el muon y las dos clases de neutrinos. Se han de considerar también las partículas gauge, a saber: el fotón, los bosones vectoriales intermedios de las interacciones débiles y el gravitón. Si la supergravedad es correcta ha de añadirse a la lista el gravitino.

Para acomodar estas partículas debe ampliarse la supersimetría local con el fin de incluir estados con espín inferior a 3/2. En principio, esta extensión se logra fácilmente, puesto que la supersimetría conecta cualquier par fermión-bosón de espines contiguos. Lo que se requiere, entonces, es añadir más partículas a la teoría como dobletes de espines contiguos. Se han desarrollado técnicas para describir las interacciones de estos dobletes con el doblete básico espín 2 y espín 3/2 de los campos gauge de supergravedad. A lo largo del año pasado se avanzaron muchas de estas teorías.

En una cierta clase de dichas teorías se puede añadir un número arbitrario de partículas en dobletes de espín 1 y espín 1/2, o de espín 1/2 y espín 0. La ventaja de estas teorías es que el número puede ajustarse casi a voluntad, para así acomodar las partículas elementales observadas. Sin embargo, se ha de pagar un precio por esta flexibilidad. Tales teorías tienen como característica contraproducente el que no puedan eliminarse los infinitos en los diagramas de un ciclo. La razón de ello reside en la falta de una unificación total. En esas teorías, no hay transformaciones de simetría que conecten el gravitón y el gravitino con las partículas de espín más bajo. Sin embargo, dichas teorías pueden llegar a representar un papel importante en la descripción de la naturaleza.

Existe otro conjunto de teorías, que se conocen por teorías generalizadas de supergravedad, mucho más restrictivo y completamente unificado. Suman ocho la cifra exacta de tales teorías; cada una de ellas tiene un número característico de distintas transformaciones bosón-fermión: número que se designa por n, el cual puede tomar valores de 1 a 8. En cada una de las teorías hay un gravitón de espín 2 y n gravitinos de espín 3/2. El número de partículas de espín inferior está asimismo completamente determinado. Si n es igual a 1, la teoría es sencillamente la supergravedad en su forma original, con un gravitón y un gravitino. Si n es igual a 2, la teoría incluye un gravitón, dos gravitinos y una partícula de espín 1. Quizás el modelo más realista de esta clase viene dado cuando n es igual a 8. El número total de partículas elementales consta entonces de un gravitón, 8 gravitinos, 28 partículas de espín 1, 56 de espín 1/2 y 70 de espín 0.

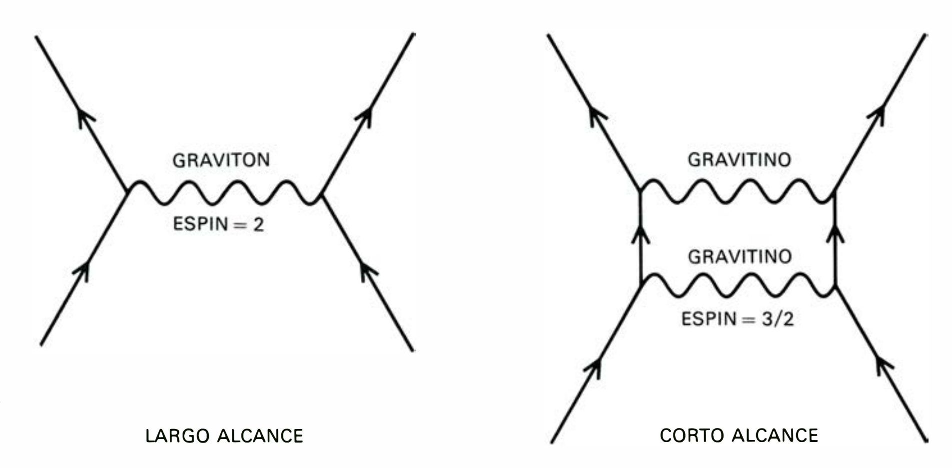
Una propiedad intrigante de las ocho teorías generalizadas de la supergravedad es su grado extremo de simetría. Cada partícula está relacionada con partículas de espín contiguo por medio de transformaciones de supersimetría, y



LAS TRANSFORMACIONES DE SUPERSIMETRIA dan por resultado un cambio en la posición de la partícula. La supersimetría se muestra como una simetría interna que importe únicamente a las propiedades de una partícula pero no a su posición. Sin embargo, hay que destacar que una transformación de supersimetría repetida, verbigracia una de un fermión a un bosón y vuelta al fermión, mueve una partícula de un punto del espacio a otro. En supersimetría local, el desplazamiento puede ser distinto en cada punto del espacio. El desplazamiento de una partícula por medio de una transformación de supersimetría sugiere una relación entre la supersimetría y la estructura del espacio-tiempo.

estas supersimetrías son locales. Así pues, un gravitón puede transformarse en un gravitino y un gravitino en una partícula de espín 1. En el seno de una familia de partículas que tienen espín igual, las partículas se hallan relacionadas por una simetría interna global, análogamente a la simetría isotópica que relaciona el protón y el neutrón. Por consiguiente, cualquier gravitino puede transformarse en otro gravitino por medio de una operación de simetría interna. Al combinar supersimetría y simetría interna, queda unificado todo el grupo de partículas. Se podría comenzar con el gravitón y, por medio de una serie de operaciones de supersimetría y otras de simetría interna, transformarlo en cualquier otra partícula elemental que esté incluida en la teoría.

Como ocurre con otras simetrías físicas, la supergravedad generalizada puede contemplarse también en términos de una "superpartícula" con una flecha en un espacio auxiliar de múltiples dimensiones. Cuando la fecha gira, la partícula pasa a ser sucesivamente un gravitón, un gravitino, un fotón, un quark y así sucesivamente. Los cuanta de todas las fuerzas están presentes en la teoría y éstas quedan unificadas o derivadas de una fuente común. Grado de unificación que jamás había sido alcanzado anteriormente por una teoría cuántica de campos.



LA SUPERGRAVEDAD corrige, a nivel cuántico, la teoría general de la relatividad. En el marco de la teoría general de la relatividad, la fuerza gravitatoria proviene enteramente del intercambio de gravitones; en supergravedad existe una contribución adicional del intercambio de gravitinos de espín 3/2. Dado que los gravitinos son fermiones, se intercambian sólo en pares, que es un proceso con probabilidad despreciable salvo a pequeñas distancias. La supergravedad no cambia las prediciones para interacciones de largo alcance; sólo se predicen efectos a escala microscópica.

Hay que cumplir un último requisito para la unificación, a saber: hacer que las simetrías internas, que relacionan las partículas dotadas del mismo espín, sean locales en vez de globales. La simetría interna local es necesaria para que se puedan incorporar las fuerzas tales como el electromagnetismo. La exigencia de invariancia local se puede satisfacer de hecho, según fue demostrado por uno de nosotros (Freedman) y Ashok Das, del City College de la City University of New York, y por E. S. Fradkin y M. A. Vasiliev, del Instituto Lebedev. Las teorías resultantes unifican potencialmente la gravitación con las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas.

En las teorías generalizadas de supergravedad, la intensidad de la fuerza gravitatoria viene determinada por un parámetro y las intensidades de las otras fuerzas por otro parámetro. En la situación ideal de cualquier teoría unificada, todas las fuerzas se regirían por una constante universal única. Existe una tercera clase de teorías supergravitatorias que gozan de esta prerrogativa. Entre otros, dieron con la más sencilla de todas ellas Michio Kaku, del City College, y Paul Townsend, de la Universidad del Estado de Nueva York en Stony Brook. Estas teorías no se basan en la teoría general de la relatividad de Einstein, sino que son generalizaciones supersimétricas de otra teoría de la gravitación propuesta por Hermann Weyl en 1923. Al igual que en la teoría de Einstein, la gravitación viene descrita por la curvatura del espacio-tiempo, si bien existe una simetría local adicional que permite que la escala con que se miden la longitud y el tiempo pueda ser elegida arbitrariamente en cada punto del espacio-tiempo. Las teorías supersimétricas correspondientes a la teoría de Weyl logran una completa fusión de la gravedad con todas las otras fuerzas, pero por ahora los otros dos tipos mencionados de teorías supergravitatorias parecen tener mayores probabilidades de éxito en las aplicaciones al mundo real.

El principio de supersimetría local lleva a una elegante unificación de las fuerzas básicas, pero la elegancia no basta. Las teorías han de pasar una prueba ante la que habían naufragado todas las teorías cuánticas de gravitación anteriores; se trata de la eliminación de los infinitos que aparecen en los cálculos de las probabilidades de interacción.

En cualquier teoría cuántica de campos, los diagramas en los que las partículas virtuales forman ciclos cerrados describen los efectos cuánticos genuinos. El cómputo de las probabilidades asociadas a cualquiera de esos diagramas requiere la suma de las partículas virtuales sobre todas las energías posibles. Estas sumas generalmente conducen a infinitos en las expresiones matemáticas de los diagramas. En algunos casos, así en electrodinámica cuántica, los infinitos son de una naturaleza relativamente inofensiva y pueden extraerse por el procedimiento de la renormalización. En gravitación cuántica, sin embargo, los infinitos son mucho peores y no pueden eliminarse por renormalización. Pero aún queda una esperanza para la supresión de los mismos. En algunos diagramas, el infinito es positivo y en otros negativo. Sólo la suma de los diagramas da una probabilidad físicamente observable, y cabe que, en la suma, los infinitos puedan cancelarse mutuamente de forma milagrosa.

La explicación de por qué los infinitos en gravitación cuántica son peores que en electrodinámica cuántica es muy sencilla. La fuerza eléctrica entre partículas cargadas es independiente de las masas o energías de las partículas; depende sólo de su carga. Por el contrario, la fuerza gravitatoria es proporcional a las masas. Puesto que en relatividad especial, masa y energía están relacionadas por $E=mc^2$, síguese que la fuerza gravitatoria crece cuando la energía de las partículas virtuales aumenta. Por tanto, al sumar las probabilidades, a las que contribuyen todas las energías posibles de las partículas virtuales, las energías altas dan una contribución mayor en el caso de la gravitación y conducen a infinitos más serios. Rudamente hablando, los infinitos, en el marco de la gravitación, son de la forma de la serie matemática 1 + 2 + 3..., mientras que en el área del electromagnetismo adoptan la forma más suave 1 + 1 + 1...

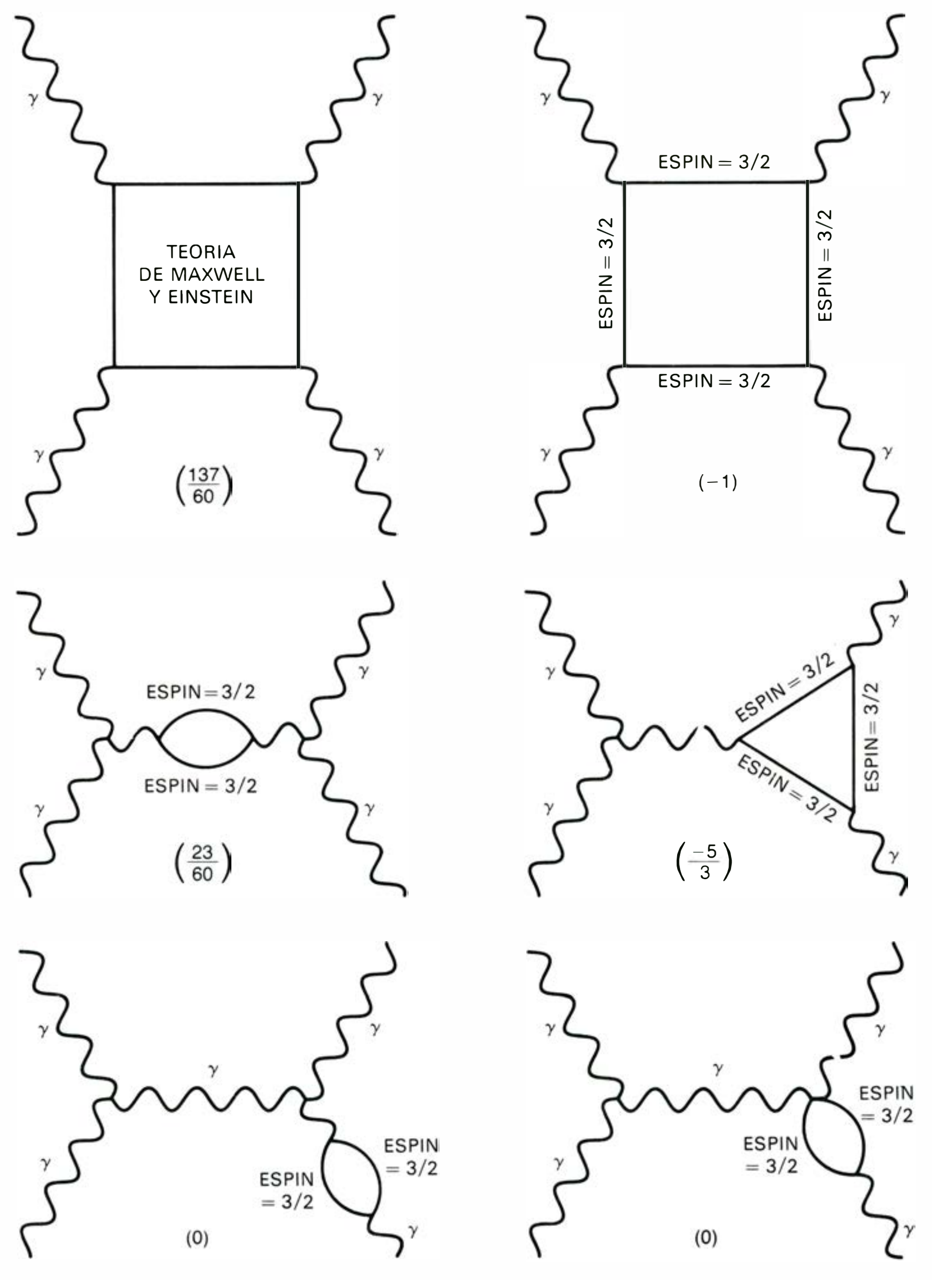
Antes de acometerse el desarrollo de la supergravedad, se llevó a cabo un cuidadoso análisis de los diagramas de un ciclo en la forma cuantificada de la rela-

tividad general. La cancelación deseada se encontró en diagramas que contenían gravitones pero no otras partículas. Este resultado fue obtenido por Bryce S. DeWitt, de la Universidad de Texas, y por 't Hooft y Veltman. Los infinitos se cancelan merced a una propiedad especial del espacio-tiempo tetradimensional; no se cancelarían si nuestro mundo tuviese otra dimensionalidad.

Dado que el mundo no está hecho sólo de gravitones, este descubrimiento parece ser de aplicación limitada. Todos los intentos de retener el resultado finito en teorías, tanto con gravitones como con otras clases de partículas, han fallado. Cuando se introducen las partículas de espín inferior, aparecen nuevamente los infinitos.

Resultó todo un acontecimiento histórico cuando un cálculo explícito de un proceso físico, conocido por estar plagado de infinitos en la teoría de Einstein, se mostró finito en el marco de la supergravedad. Trabajo teórico ulterior y nuevos cálculos explícitos han demostrado que, en cada una de las ocho teorías de supergravedad generalizada, la suma de todos los diagramas con un ciclo es finita para todos los procesos físicos. La clarificación del problema de los infinitos en teoría gravitatoria cuántica constituye uno de los rasgos más estimulantes de la supergravedad.

La cancelación exacta de varias docenas de términos infinitos es demasiado extraordinaria como para que sea enteramente fortrita, y tiene una explicación sencilla. Consideremos, en primer lugar, el subconjunto de diagramas de un ciclo en los que todas las partículas entrantes y salientes sean gravitones; las demás partículas podrán aparecer en estos diagramas tan sólo como virtuales. Se puede demostrar que la suma de todos los diagramas de este conjunto es finita por una extensión del resultado similar obtenido en el marco de la relatividad general.



SE OBTIENE UNA PROBABILIDAD FINITA para diagramas con ciclos en una teoría cuántica de la gravitación al incluir gravitinos en la interacción. Los diagramas que se muestran aquí son los de la interacción entre dos fotones. El primer diagrama, señalado por Maxwell-Einstein, contiene todos los diagramas de un ciclo que considera sólo gravitones y fotones; la contribución de estos diagramas es una cantidad infinita multiplicada por 137/60. Se pueden construir cinco diagramas de un ciclo incluyendo gravitinos; cada uno de ellos es proporcional al mismo término infinito multiplicado por los coeficientes que se muestran entre paréntesis. Sólo la suma de los diagramas es observable, y, añadiendo los coeficientes, se ve que la suma es cero. Las contribuciones infinitas de los gravitinos cancelen las de los gravitones y los diagramas tienen una probabilidad finita.

En las ocho teorías de supergravedad generalizada se obtienen también resultados finitos para diagramas con partículas entrantes y salientes de espín más bajo. Los infinitos se cancelan en estos diagramas en virtud de la total unificación de las teorías. Por ejemplo, los diagramas con fotones entrantes o electrones salientes pueden relacionarse con diagramas cue tienen sólo gravitones aplicando las transformaciones de simetría válidas en estas teorías. En efecto, todos los diagramas se pueden reducir a los que tienen únicamente gravitones; y es ya conocido que los diagramas que contienen sólo gravitones dan una suma finita.

Los infinitos se cancelan exclusivamente en las teorías supergravitatorias generalizadas, porque sólo en ellas pueden todas las partículas transformarse en gravitones. Otras teorías supergravitatorias que incluyen un número arbitrario de partículas de espín 0, 1/2 y 1 carecen de la simetría crucial entre las partículas de espín 1 y los gravitinos de espín 3/2. En las teorías basadas en la teoría gravitatoria de Weyl, los infinitos no presentan ningún problema para diagramas con cualquier número de ciclos. Por otra parte, en estas últimas no se sabe si las probabilidades tienen siempre valores positivos, que es un criterio necesario para cualquier teoría física con sentido.

El proceso en que se descubrió, por primera vez, la cancelación de infinitos mediante cálculo explícito fue la difusión de un fotón por otro fotón. En el marco de la relatividad general, cada uno de los diagramas de un ciclo para este proceso

tiene una amplitud de probabilidad asociada que consiste en una cantidad infinita multiplicada por un coeficiente, que suele ser una fracción. La suma de los coeficientes es mayor que cero e infinita la amplitud de probabilidad de difusión. En la esfera de la supergravedad, se han de añadir al cálculo diagramas que contengan gravitinos. Cada uno de estos diagramas es también infinito, pero la suma de los coeficientes de todos los diagramas resulta ahora cero.

Hasta el presente se han completado cálculos explícitos para otros procesos en supergravedad. Y se han encontrado más argumentos teóricos que indican que, en las ocho teorías generalizadas supergravitatorias, los infinitos se cancelan también al sumar todos los diagramas de dos ciclos. Los resultados finitos fueron obtenidos primero por uno de nosotros (van Nieuwenhuizen) con Marcus T. Grisaru, de Brandeis, y J. A. M. Vermaseren, de la Universidad de Purdue.

La supergravedad representa un avance teórico de importancia, toda vez que permite abrigar esperanzas para resolver importantes y permanentes problemas de la física: la unificación de las fuerzas fundamentales y la eliminación de infinitos en gravitación cuántica. Asimismo, se vislumbra un orden en la teoría, profundamente satisfactorio, a partir de la unificación de fermiones y bosones y de la derivación de todas las fuerzas de la exigencia común de simetría local. Falta por determinar todavía si este orden existe en la naturaleza. También quedan por superar algunas dificultades en la interpretación de la teoría.

Se plantea un nuevo problema a raíz de la exigencia de que la simetría interna, en el marco de la supergravedad generalizada, sea local. Al ir de una simetría global a otra local se introduce un término inesperado en las ecuaciones; a éste se le conoce con el nombre de término cosmológico, y ya fue analizado por Einstein en las aplicaciones tempranas de la relatividad general a la cosmología. El efecto del término cosmológico es asignar un tamaño finito al universo. La aparición del término cosmológico en este contexto es enigmático: la simetría interna tiene que ver con las fuerzas electromagnéticas y nucleares, y resulta curioso que afecten al tamaño del universo. Y lo que es peor, el valor del término cosmológico predicho por la teoría excede el límite superior deducido a partir de observaciones experimentales.

Hay otra contradicción con la observación todavía más llamativa. En las teorías supergravitatorias generalizadas, las partículas carecen de masa, pero no hay duda de que muchas de las partículas reales, como el electrón por ejemplo, tienen masa distinta de cero. Un enfoque prometedor del problema es suponer que algunas de las partículas, en el marco de la supergravedad generalizada, adquieren masa a través de un mecanismo de ruptura espontánea de simetría. Esto puede explicar por qué no se han observado los gravitinos fundamentales, predichos por la supergravedad generalizada. Pudiera ser que su masa fuera tan grande que los actuales aceleradores no sean lo suficientemente energéticos para crearlos. Resulta incitadora, asimismo, la observación de que la ruptura espontánea de simetría cambia también el término cosmológico en teoría cuántica de campos. La cuestión de si se pudiera reducir ese término en supergravedad generalizada se encuentra actualmente en estudio.

TEORIA	INDICE DE PARTICULAS				
	ESPIN = 0	ESPIN = 1/2	ESPIN = 1	ESPIN = 3/2	ESPIN = 2
$N = 1$				1	1
$N = 2$			1	2	1
$N = 3$		1	3	3	1
$N = 4$	2	4	6	4	1
$N = 5$	10	11	10	5	1
$N = 6$	30	26	16	6	1
$N = 7$	70	56	28	7	1
$N = 8$	70	56	28	8	1

LAS TEORIAS GENERALIZADAS DE LA SUPERGRAVEDAD incorporan, además de gravitones y gravitinos, partículas elementales de espín más bajo, algunas de las cuales podrían corresponder a partículas conocidas, por ejemplo el fotón y el electrón. Existen ocho teorías de éstas, y cada una se designa por un número *n*, igual al número de gravitinos de espín 3/2 que se incluyen en la teoría. Para que cualquier teoría de éstas sea una descripción válida de la naturaleza, el conjunto de las partículas que predice debe incluir todas las partículas elementales del universo. De esta manera, todos los estados elementales de la materia se unificarían, si bien seguirá planteado un problema inquietante, a saber: ni siquiera la mayor de las teorías generalizadas tiene lugar suficiente para todas las partículas conocidas de espín 1/2 y 1. (Dibujo de Gabor Kiss.)

Para considerar la supergravedad como una teoría realista, se exige, como condición importante, dar una prueba definitiva de que los infinitos se cancelan al sumar todos los diagramas de ciclos. Hasta ahora, la cancelación se ha demostrado sólo para diagramas con uno o dos ciclos. Pero no son menos importantes los que poseen tres o más ciclos. Para demostrar que son finitos se requerirán, a buen seguro, técnicas matemáticas cualitativamente diferentes. Lo más deseable sería una prueba general de que la suma de todos los posibles diagramas es finita.

El carácter específico de la supergravedad generalizada ha de contarse entre sus virtudes más que entre sus defectos. Las ocho teorías tienen pocos parámetros libres o ajustables; por tanto, dan predicciones bien definidas. En efecto, cada teoría proporciona una lista completa de todas las partículas elementales de la naturaleza. Las predicciones no corresponden enteramente, sin embargo, a la lista de partículas elementales conocidas hasta ahora. La teoría más prometedora resulta ser cuando *n* equivale a 8. Esta teoría es la de mayor alcance en supergravedad generalizada, y algunas de sus familias de partículas ostentan una semejanza muy atractiva con los grupos ya conocidos en la naturaleza. Por ejemplo, Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, ha demostrado recientemente que, tras la ruptura espontánea de simetría, la teoría predice correctamente ciertas propiedades de los quarks, tales como sus cargas eléctricas. La predicción es muy notable, puesto que a los quarks, entre todas las partículas elementales, se les asigna cargas eléctricas fraccionarias. Por otra parte, la misma teoría tiene una grave deficiencia. No hay cabida para otras partículas conocidas, como el muon y los mesones vectoriales intermedios.

En última instancia, estos problemas deben resolverse en la continuación del estudio de las teorías supergravitatorias y, quizá, mediante su revisión.

Podría llegarse a la conclusión de que lo que en verdad debe revisarse es la opinión actual sobre cuáles sean las partículas elementales de la naturaleza.

Sistemas pasivos de refrigeración en la arquitectura iraní

No usan más energía que la del sol y el viento; sin embargo, hacen circular aire fresco por las edificaciones y desde antaño han aportado el agua fría y el hielo necesarios para el cálido verano del árido país

Mehdi N. Bahadori

El ambiente interno de un edificio moderno puede ser agradable por muy desagradable que resulte el ambiente exterior. Esto se debe, en general, a que se gasta a manos llenas energía para caldearlo o refrescarlo. Antaño, en cambio, cuando no había tanta energía a disposición, y no existían máquinas como los aparatos de aire acondicionado, los arquitectos habían de emplear otras estratagemas para maximizar el agrado del medio ambiente interno. Así por ejemplo, la arquitectura tradicional de muchas culturas florecientes en climas cuyas temperaturas son incómodamente altas durante el día, e incómodamente frías por la noche, crearon edificaciones de gruesos muros de ladrillo o piedra. Muros que son a un tiempo aislantes y acumuladores térmicos, de manera que durante las horas más calientes del día el flujo de calor, desde el ambiente exterior al interior, se retarda, y, durante las horas más frías de la noche, el ambiente interior se calienta con parte del calor acumulado en esos muros y el resto se disipa hacia el ambiente exterior. El resultado neto es un alisamiento de la curva de variación de la temperatura dentro del edificio. En una época en la cual se está procediendo a una intensa revalorización de los costos energéticos de los edificios, esas medidas merecen evidentemente un detenido estudio.

En ciertos proyectos tradicionales de la arquitectura del Irán se logra algo más que el alisamiento de la curva de temperaturas; en ellos circula aire frío a través del edificio y se puede mantener fría el agua y congelado el hielo, desde el invierno hasta el clímax del largo y cálido verano de las áridas llanuras centrales y orientales del país. Esto se realiza sin consumir otra energía que la del medio ambiente natural, por lo que puede caracterizárseles como sistemas pasivos de enfriamiento. Algunos de esos sistemas, por ejemplo los de techos curvos, figuraban ya en edificios del año 3000 a.C. Puede que otros, como por ejemplo los sistemas de torre eólica, la cisterna y el congelador, no hayan surgido sino hasta alrededor del año 900 d.C. Muchos de los sistemas de refrigeración pasiva siguen usándose hoy en día.

Los sistemas pasivos de enfriamiento adoptan muchas formas. Por ejemplo, en las regiones áridas de Irán, los edificios se han construido tradicionalmente arracimados, unidos unos a otros por muros comunes. Los días estivales de ese clima se caracterizan obviamente por grandes insumos de radiación solar. El arracimar los edificios disminuye en conjunto su área superficial expuesta, y, por tanto, el calor solar que acumulan. (Los edificios arracimados eran también más fáciles de defender.) La transferencia de calor procedente del aire exterior disminuye aún más al limitar el número de puertas y ventanas. El verano iraní es ventoso y polvoriento, por lo que este detalle sirve también para que entre menos polvo en las casas.

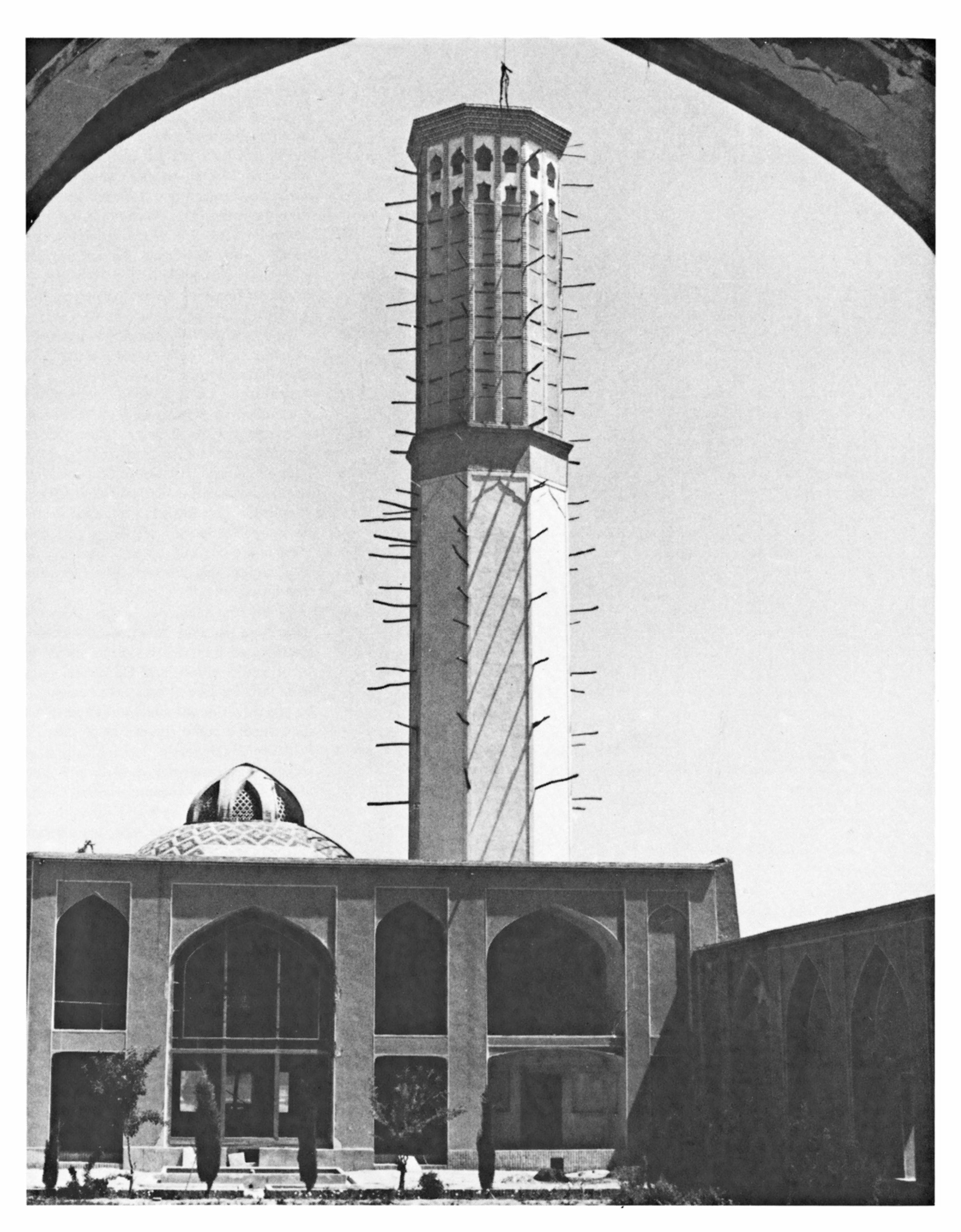
Aunque en las regiones áridas los días de verano son sumamente calurosos, la noche es fría. Varios detalles de la arquitectura iraní están ideados para aprovechar esta amplia variación diaria de la temperatura. Los muros de los edificios se construyen de bloques de adobe y, al igual que los muros en regiones de clima parecido, son notablemente gruesos, por lo que poseen una elevada capacidad calórica. Por consiguiente, pueden absorber la diaria carga calórica solar en vez de transmitirla inmediatamente al interior del edificio. El calor se almacena en los muros y, más tarde, se libera hacia el interior del edificio y hacia el frío aire nocturno.

Otra forma en que la arquitectura iraní ha aprovechado el aire frío de la noche es creando patios con árboles y arbustos. Las plantas protegen los muros de las habitaciones que dan al patio, disminuyendo la carga de calor solar sobre tales muros, y éstos y las plantas permanecen frescos durante varias horas por la mañana.

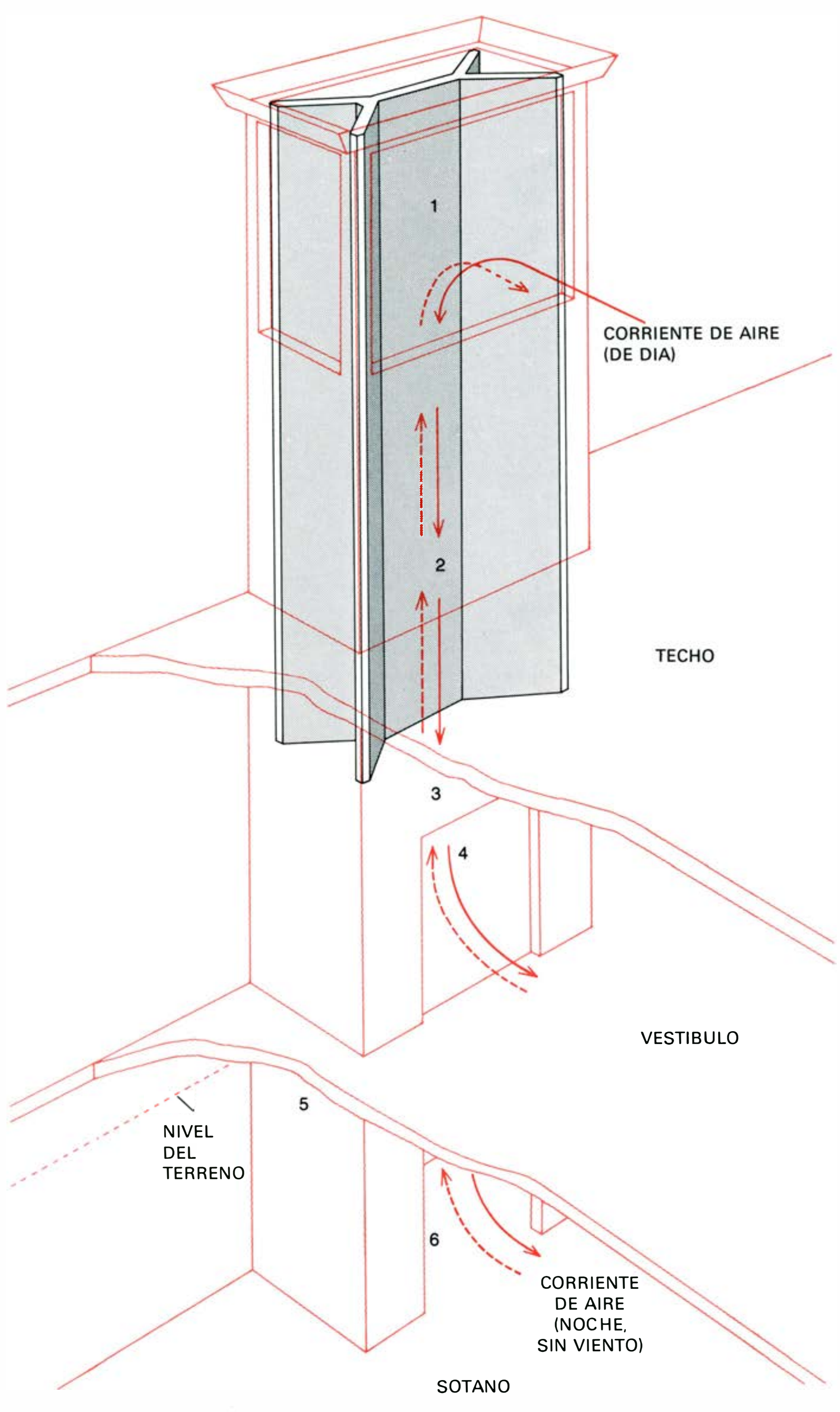
Antaño, la gente que vivía en las edificaciones de las regiones áridas de Irán tenía modos de comportamiento que maximizaban su comodidad. Por ejemplo, muchos vivían en sótanos, especialmente durante las cálidas tardes veraniegas, porque la temperatura relativamente baja del suelo mantenía frescas las habitaciones del sótano. Durante las frescas noches estivales, muchos dormían en los terrados, que tenían parapetos para ofrecer intimidad y dar amparo contra los polvorientos vientos de verano. Además, las calles eran estrechas, de modo que los parapetos protegían a los edificios vecinos (y a los transeúntes), disminuyendo la carga de calor solar.

Estos métodos prestaban gran alivio ante el duro clima; había, empero, cuatro ingeniosos sistemas pasivos de refrigeración que lograban todavía más, a saber: la torre eólica, el respiradero, la cisterna y el congelador. Describiré brevemente cada uno de estos sistemas.

En las regiones áridas de Irán el viento tiene características estacionales y diarias bastante regulares. El "captador de



TRES SISTEMAS PASIVOS enfrían este edificio de la ciudad de Yazd, Irán: una torre eólica, un techo semiesférico y un respiradero. La torre eólica actúa enfriando el aire ambiente y haciéndolo circular por el edificio. (De la torre sobresalen los extremos de las vigas de madera que la refuerzan, que se dejan como soportes de andamios para mantenimiento del exterior). El techo abovedado, a la izquierda, actúa manteniendo fresca la habitación que cubre. La estructura situada sobre el techo tapa el respiradero, que también sirve para enfriar la habitación subyacente y para mantener aire en circulación a través de ella. Los tres sistemas de enfriamiento refrigeran el edificio en los meses de verano.



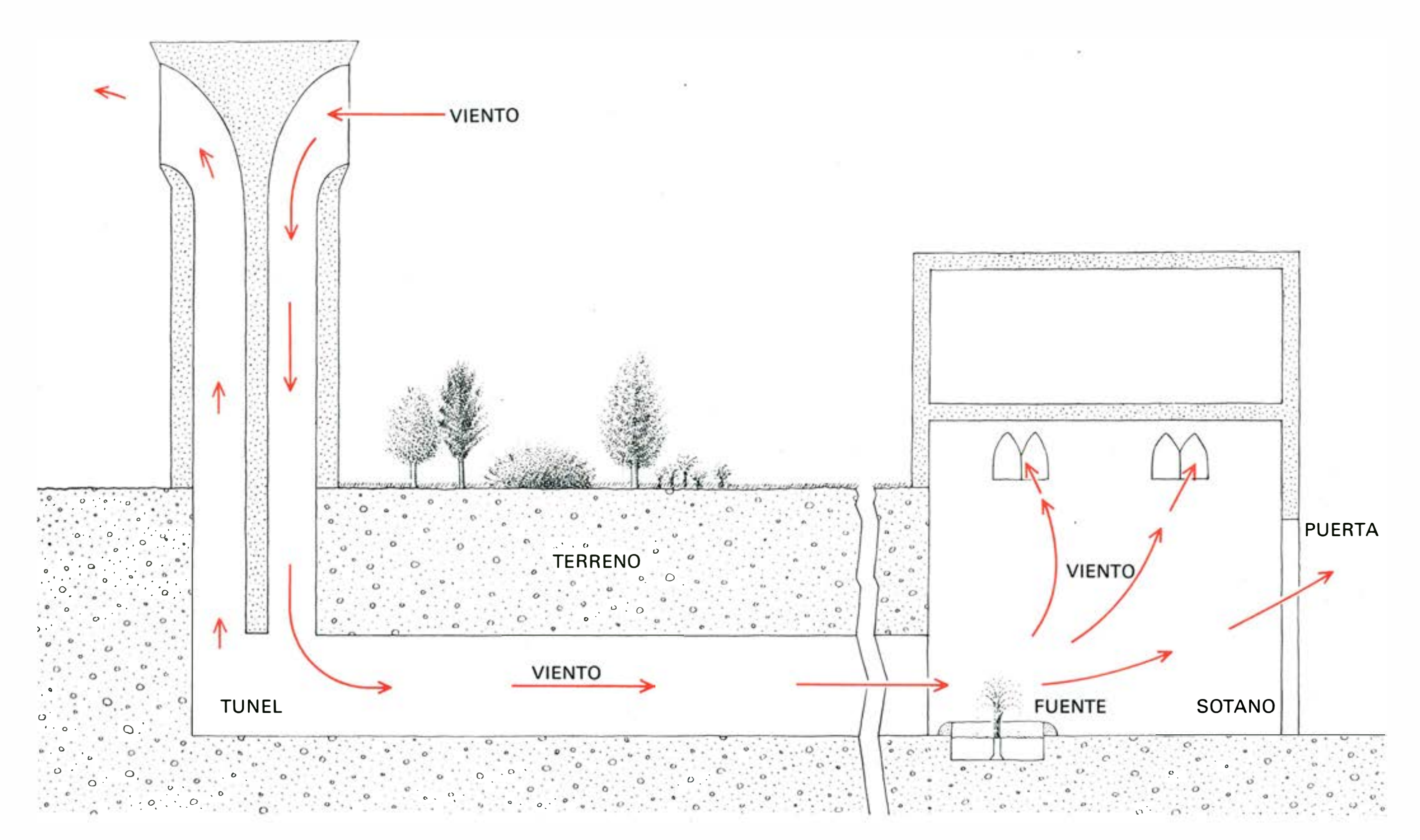
UNA TORRE EOLICA FUNCIONA de diversas maneras según el momento del día y la presencia o ausencia de viento. Los muros y canalizaciones de aire de la torre (*2*) absorben calor durante el día y lo descargan en el aire frío de la noche. Al día siguiente, los muros están frescos. Cuando no hay viento, el cálido aire ambiente (*flechas llenas*) entra en la torre a través de las aberturas laterales (*1*) y se enfría al tocar la torre. Como el aire frío es más denso, baja por dentro de la torre, creando una corriente descendente (*2, 3, 5*). Cuando hay viento, el aire se enfría con más eficiencia y circula a mayor velocidad. Unas puertas dispuestas en la base de la torre (*4, 6*) se abren al vestíbulo central y al sótano. Cuando están abiertas, el aire enfriado procedente de la torre es impulsado a través del edificio, saliendo a través de las ventanas y demás puertas, arrastrando consigo el aire de las habitaciones. La ruta seguida por el aire enfriado depende de la disposición de las puertas en edificio y torre. (Parte del aire que baja por las canalizaciones de barlovento de la torre es obligado a retroceder ascendiendo por las canalizaciones opuestas y a salir por las aberturas de sotavento.) Cuando es de noche y no hay viento (*flechas de trazos*), la torre funciona como una chimenea. El calor que se ha acumulado en los muros durante el día calienta el frío aire nocturno de la torre. Como al calentarse el aire disminuye su densidad, baja la presión en la parte superior de la torre, creándose una corriente ascendente. El aire contenido en el edificio es aspirado por la torre y entra en el edificio aire fresco de la noche a través de puertas y ventanas. Cuando hay viento de noche, desciende aire por la torre y circula por el edificio. Como los muros de la torre calientan el aire nocturno antes de que entre en el edificio, la tasa de enfriamiento puede ser menor.

viento" o torre eólica aprovecha los vientos estivales predominantes para enfriar el aire y hacerlo circular a través de un edificio. Una torre eólica típica se asemeja a una chimenea. Su extremo inferior se abre al sótano y el superior sobresale del techo. La parte superior de la torre está dividida en varias canalizaciones verticales de aire que terminan en aberturas laterales. Los diseños de torre difieren en cuanto a altura, sección transversal de las canalizaciones, colocación y número de aberturas y colocación de la torre respecto de la estructura que enfría.

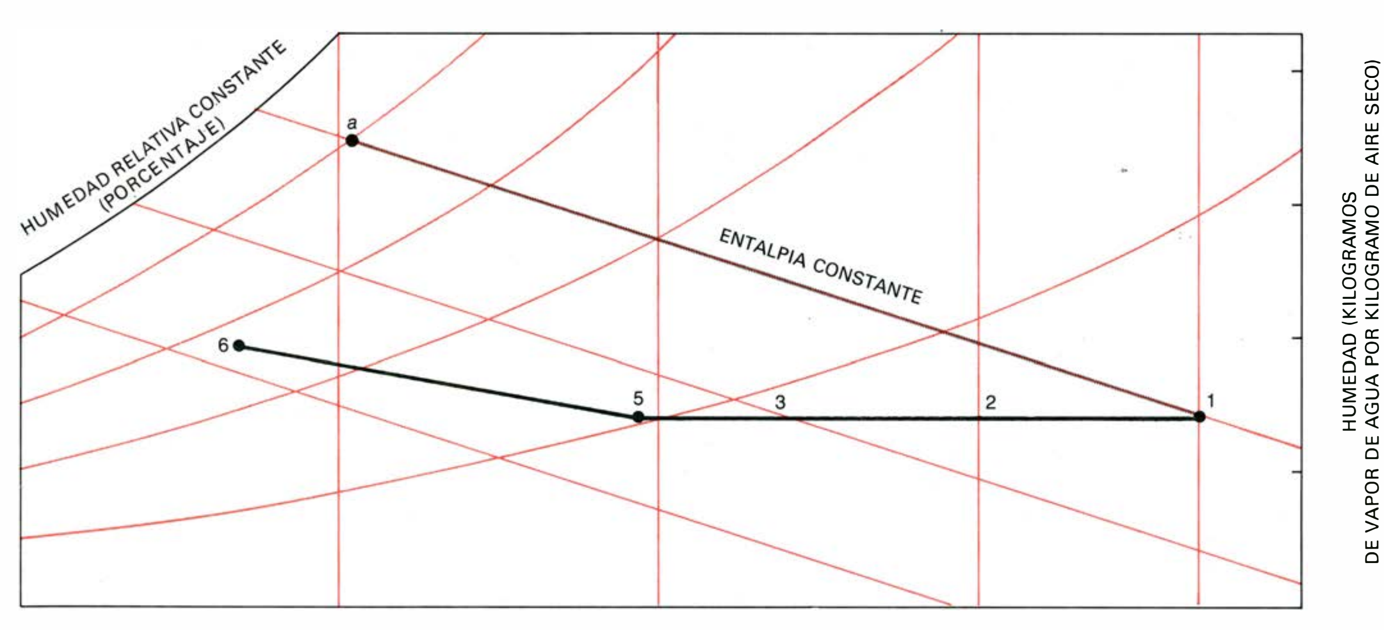
La torre eólica funciona haciendo cambiar la temperatura, y por tanto la densidad del aire, en su interior y en su entorno. La diferencia de densidad crea una corriente ascendente o descendente dentro de la torre. Unas puertas dispuestas en la base de la torre se abren hacia el sótano y el vestíbulo central de la planta principal del edificio. La corriente de aire que pasa a través de diversas partes puede regularse abriendo y cerrando las puertas de la torre y de las habitaciones situadas por fuera del vestíbulo central.

El funcionamiento de la torre depende de la hora del día y del estado del viento. Cuando no hay viento por la noche, la torre actúa como una chimenea, pues hace circular aire al extraerlo hacia arriba y a través de sus aberturas superiores. Esto sucede como sigue: Las paredes de la torre (incluyendo los tabiques que separan las canalizaciones de aire) han absorbido calor durante el día. Como el calor se transmite en la dirección de la temperatura decreciente, las paredes entregan calor al frío aire nocturno situado dentro de la torre y alrededor de ella. La configuración de la parte superior de la torre, a saber, el espesor de sus paredes y la sección transversal de las canalizaciones de aire, está proyectada de manera que la capacidad de acumular calor y la superficie para transferencia de calor sean suficientes para la tarea. Como el aire más caliente es menos denso, disminuye la presión de aire en el ápice de la torre, creándose una corriente ascendente. El aire contenido en el edificio es aspirado por la torre, al tiempo que el aire frío ambiente penetra en el edificio a través de sus puertas y ventanas. El proceso continúa durante la noche, de modo que se mantiene una circulación de aire frío por el interior de la casa.

Cuando sopla el viento por la noche, se obliga al aire a funcionar en dirección opuesta; las habitaciones se enfrían mediante aire nocturno que baja por la torre



DOS TIPOS DE ENFRIAMIENTO se producen en el sistema pasivo ilustrado aquí. En el enfriamiento sensible, la pérdida de calor hace que el aire alcance una menor temperatura, pero no varía su humedad. El aire situado en la parte superior de una torre eólica sufre un enfriamiento sensible. Cuando se introduce agua en un sistema, se origina un enfriamiento evaporativo. Esto implica cambiar tanto la temperatura como la humedad del aire. Cuando el aire no saturado entra en contacto con agua, parte del agua se evapora. El proceso es impulsado por el calor del aire, de modo que, al disminuir la temperatura del aire, aumenta su humedad. Un sistema de torre eólica que produce un enfriamiento evaporativo y sensible del aire es sumamente eficaz. En la mayoría de las torres eólicas se infiltra agua del suelo hasta el interior de los muros del sótano de la torre, de manera que el aire que pasa sobre esos muros sufre un enfriamiento evaporativo. En el sistema ilustrado aquí, el enfriamiento evaporativo cumple una función aún más importante. La torre eólica está situada a unos 50 metros del edificio, al cual está unida por un túnel. Cuando los árboles, arbustos y césped del terreno sobrepuestos al túnel se riegan, el agua se infiltra y mantiene húmedas las superficies internas de los muros del túnel. La piscina y la fuente, que se encuentran en el sótano del edificio, enfrían todavía más el aire.



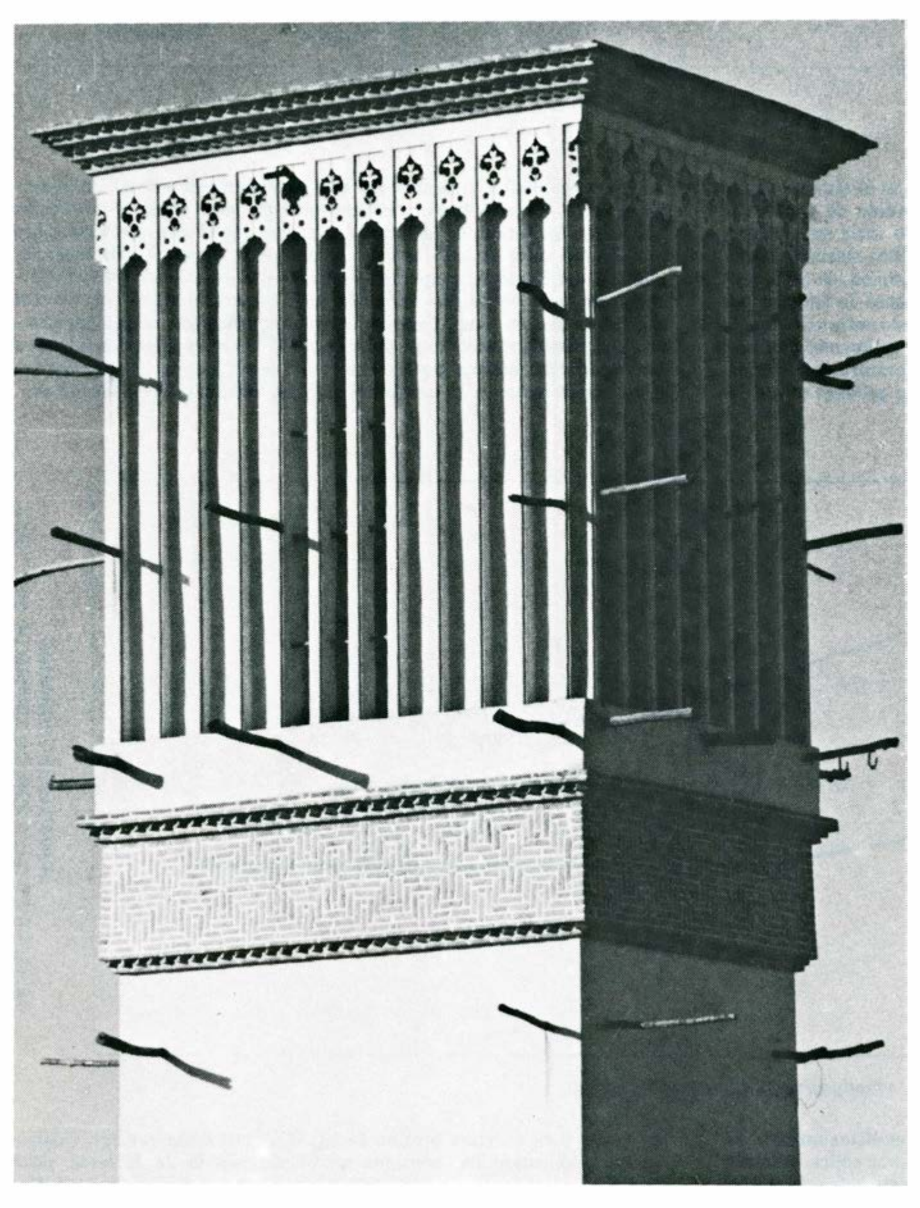
EL ABACO PSICROMETRICO muestra el acondicionamiento del aire durante el día, conforme pasa a través de la torre eólica ilustrada en la página anterior. El aire que circula por la torre sufre un enfriamiento sensible (*1, 2, 3, 5*), de modo que su temperatura disminuye pero no así su humedad, que permanece constante. Ahora bien, como la capacidad del aire para retener agua disminuye al bajar la temperatura, aumenta la humedad relativa (relación entre la presión efectiva de vapor y la máxima presión de vapor a igual temperatura). Cuando circula aire sobre los húmedos muros del sótano de la torre, sufre también un enfriamiento evaporativo y aumenta su humedad (*5, 6*). Por consiguiente, la temperatura del aire, ya enfriado, desciende aún más y su humedad absoluta y relativa aumentan antes de que entre en el sótano del edificio. La línea *1-a* muestra el acondicionamiento del aire que se produce cuando solamente existe un enfriamiento evaporativo.

en vez de entrar por puertas y ventanas. En este caso, aunque las paredes de la torre calientan el aire nocturno antes de que entre en el edificio, la refrigeración puede, sin embargo, ser lo bastante eficaz como para aproximar la temperatura del edificio a la del aire ambiente. Los muros exteriores y el techo del edificio irradian el calor solar acumulado hacia el cielo nocturno, lo que enfría aun más la construcción. Como las noches del desierto suelen ser muy despejadas, la transferencia de calor por irradiación resulta muy eficiente.

Si no sopla el viento durante el día, el funcionamiento de la torre es opuesto al de una chimenea. Las paredes de su parte superior se han enfriado durante la noche precedente. El cálido aire ambiente se enfría al ponerse en contacto con ellas, se hace más denso y se hunde por dentro de la torre, creando una corriente descendente. El aire enfriado es soplado a través del edificio hasta salir por puertas y ventanas, arrastrando consigo el aire presente en las habitaciones.

Cuando hay viento durante el día, aumenta la velocidad de circulación, y mediante una disposición apropiada de las puertas de la torre y de las habitaciones, puede hacerse circular el aire por cualquier habitación del edificio. Si durante el día no hay viento, cuando la temperatura de la torre llega a ser la del aire ambiente, cesa la corriente descendente por la torre y hacia el interior del edificio; la torre empieza a funcionar entonces como una chimenea. (Naturalmente que el funcionamiento de la torre no es constante a lo largo del día y de la noche; el efecto de enfriamiento y la duración de cada fase del funcionamiento de la torre cambian según las fluctuaciones de la temperatura del aire, de la intensidad de la radiación solar, de la velocidad del viento, etcétera).

Las aberturas de la parte superior de la torre están dispuestas en pares, de forma que, por cada abertura de barlovento, hay una de sotavento. Cuando están cerradas las puertas de la base de la torre, al viento que desciende por ella se le hace ascender obligadamente por las canalizaciones opuestas y salir por las aberturas de sotavento. De hecho, aunque las puertas de la base de la torre estén abiertas, parte del aire que desciende por ella sale por dichas aberturas. La corriente ascendente creada en las canalizaciones opuestas arrastra aire de las habitaciones y lo aspira por la torre. En otras palabras, durante el funcionamiento normal de una torre eólica hay siempre cierta cantidad de aire de las habitaciones que sale arrastrado por las aberturas de sotavento. De este modo la torre crea una circulación continua de aire a través del edificio.

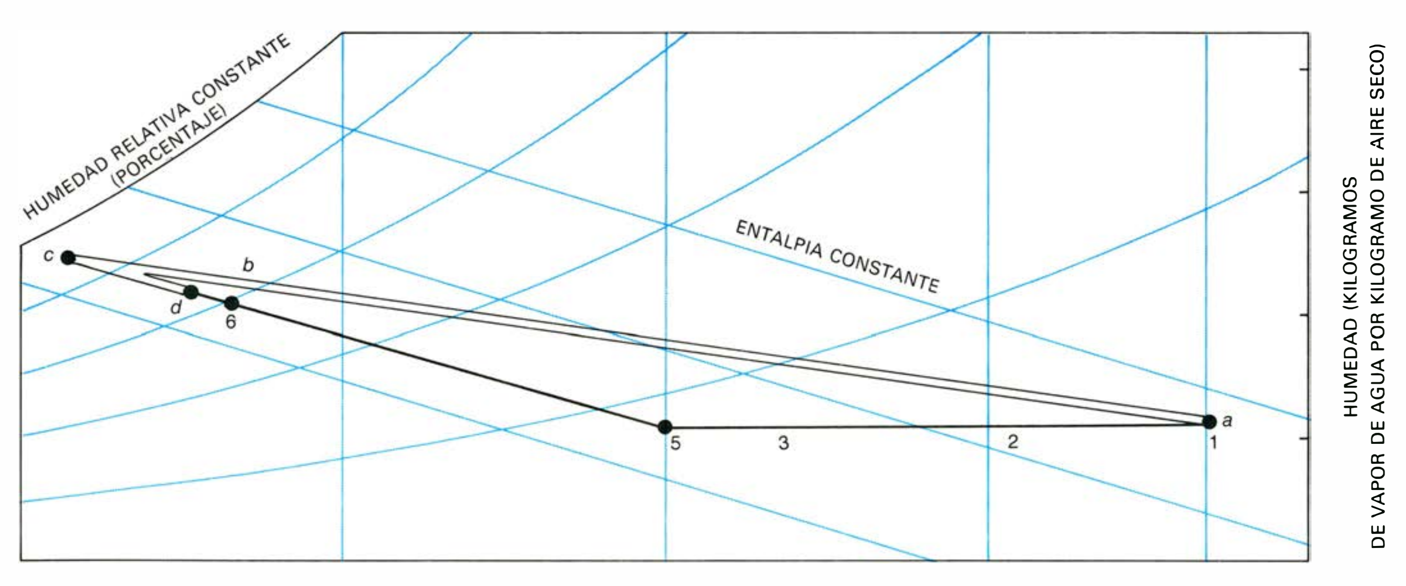


PRIMER PLANO DEL APICE DE UNA TORRE EOLICA de Yazd, en donde se ven los extremos de sus vigas. La torre tiene unos 13 metros de altura y sus aberturas miden unos tres metros. La torre ilustrada en la página 93 tiene unos 34 m de altura y sus aberturas miden unos 11 m.

Hasta aquí he examinado solamente los cambios de temperatura de las torres eólicas ocasionados por lo que se conoce por enfriamiento sensible. Se habla de enfriamiento sensible del aire cuando cambia su temperatura sin que varíe su humedad, es decir, su contenido en vapor de agua. Cuando al mismo tiempo que cambia la temperatura varía la humedad se produce un enfriamiento evaporativo, el cual puede desempeñar un importante papel en el funcionamiento de las torres eólicas. Por ejemplo, cuando los muros del sótano de una torre están húmedos, como suele ocurrir, el aire que desciende por ella sufre un enfriamiento sensible y evaporativo a la vez. En otras palabras, el agua presente en los muros absorbe calor suficiente como para evaporarse. Como la evaporación necesita cantidades relativamente grandes de calor, las torres eólicas dotadas de procesos evaporativos pueden enfriar muy eficientemente el aire. De hecho, antes de que las neveras eléctricas llegaran a ser de uso corriente en Irán, los húmedos sótanos de las torres eólicas servían como cámaras frigoríficas. Además, el humedecimiento del aire que acompaña a los procesos evaporativos es una aportación importante a la comodidad a menores temperaturas.

Otra manera de aprovechar el enfriamiento evaporativo consiste en colocar una pequeña piscina provista de una

UNA CORRIENTE SUBTERRANEA de agua y una torre eólica constituyen en conjunto un eficaz sistema de enfriamiento. En el sistema ilustrado aquí, un pozo comunica la corriente con la superficie y otro la comunica con el sótano del edificio por enfriar. Entra aire caliente y seco hacia la canalización del agua a través de un pozo exterior al edificio (*a*) y sufre un enfriamiento sensible y evaporativo conforme pasa sobre el agua (*b*). Como el agua subterránea suele estar fría, la tasa de enfriamiento es bastante elevada. La torre eólica se sitúa de modo que el viento que entra a través de la puerta del sótano de la torre pasa sobre la boca del pozo que comunica con el agua. Cuando el aire procedente de un conducto de gran diámetro (el túnel) entra en otro más estrecho (la puerta), su presión disminuye. La presión del aire procedente de la torre disminuye aún más cuando pasa sobre la boca del pozo, de modo que aspira y arrastra aire frío y húmedo del pozo (*c*). La mezcla del aire del pozo y de la torre (*d*) circula a través del sótano. Una corriente subterránea de agua puede servir para varios sistemas de torre eólica de este tipo.



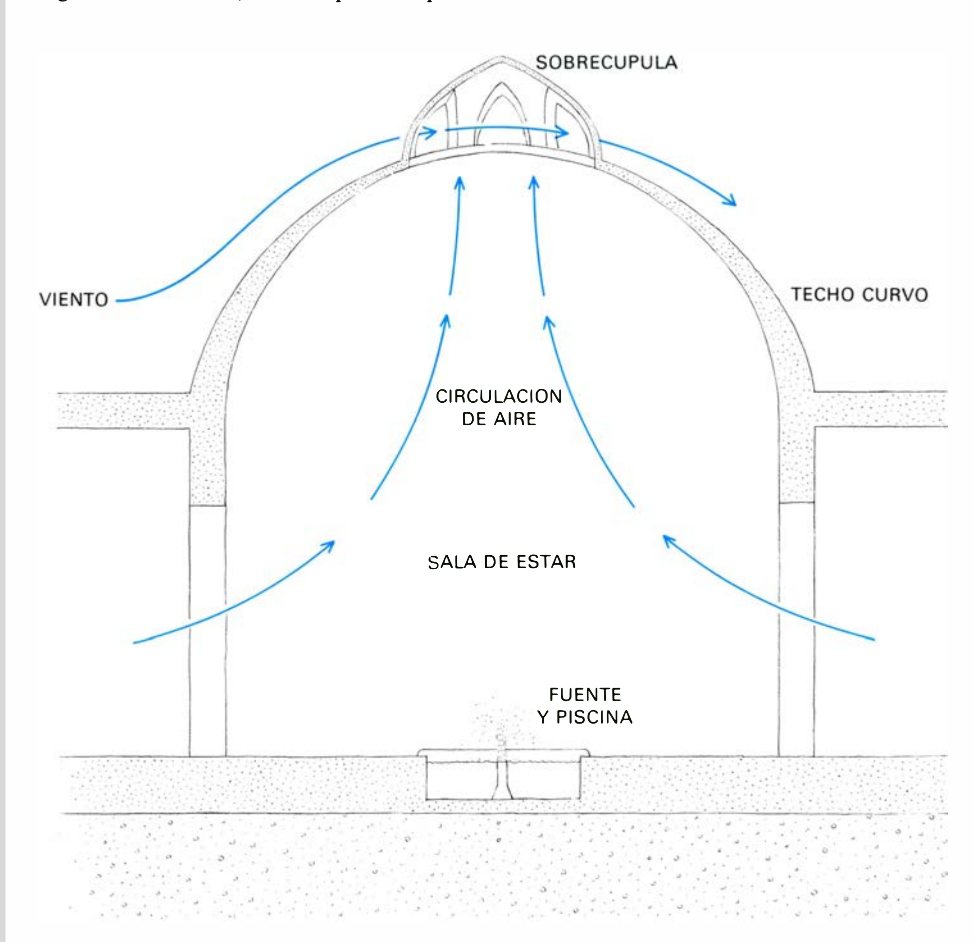
ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE mediante un sistema de torre eólica y corriente subterránea de agua. Entra aire caliente y seco en el sistema por dos lugares diferentes (*1-a*). El aire que entra en la torre eólica (*línea negra*) sufre un enfriamiento sensible al descender por ella; la temperatura del aire disminuye y su humedad relativa aumenta (*1, 2, 3, 5*). El aire sufre también un enfriamiento evaporativo conforme pasa sobre los húmedos muros del sótano de la torre; la temperatura disminuye y aumentan la humedad absoluta y relativa (*5, 6*). El aire caliente y seco que entra en el canal subterráneo de agua (*línea doble*) sufre un enfriamiento sensible y evaporativo al pasar por el agua fría. Se produce así un gran descenso de la temperatura del aire y un gran aumento en su humedad absoluta y relativa antes de que ascienda por el pozo hacia el sótano del edificio (*a, b, c*). En el sótano, el aire frío y húmedo procedente del canal subterráneo (*c*) se mezcla con el aire más cálido y seco procedente de la torre eólica (*6*). La mezcla final (*d*) es el aire que circula por el sótano. Los números y letras son los de arriba.

fuente en la parte inferior de la torre. El viento puede sufrir un enfriamiento sensible y evaporativo al descender por la torre, y un enfriamiento evaporativo en la piscina y la fuente, antes de entrar en las habitaciones del edificio. En la ciudad de Yazd, en Irán, hay muchos edificios con torres de este tipo.

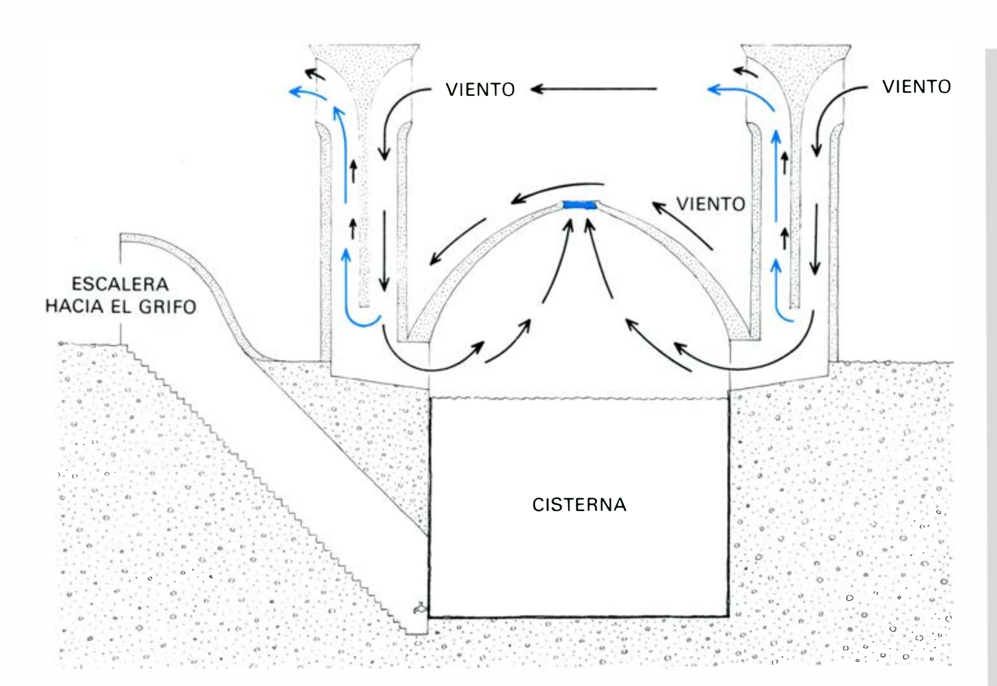
En la ciudad de Bam existe una torre eólica que opera de manera diferente. Está colocada a unos 50 metros del edificio al cual sirve, y su base queda unida al sótano del edificio mediante un túnel subterráneo. El terreno bajo el cual corre el túnel está plantado de árboles, arbustos y césped. Cuando se riega este terreno, el agua lo impregna de manera que mantiene húmedas las paredes del túnel, y el aire que desciende por la torre y pasa por el túnel sufre un enfriamiento sensible y evaporativo. Se logra un enfriamiento aún mayor mediante un estanque con su fuente situado a la entrada del sótano.

Otra variación de la torre eólica funciona conjuntamente con un canal de agua subterráneo, unido por un pozo vertical al sótano del edificio. La torre está situada de modo tal que el aire que sale por la puerta que da al sótano pasa por la parte superior de dicho pozo. Cuando el aire que está pasando por una canalización entra en otra de menor diámetro, aumenta su velocidad y disminuye su presión. El área de la sección transversal de la torre es mayor que la de la puerta, de manera que la presión del aire proveniente de la torre disminuye aún más conforme pasa sobre el pozo. Cuando el aire procedente de la torre pasa a gran velocidad sobre la boca del pozo, se crea allí un foco de arrastre. El resultado es que la corriente del aire que baja de la torre aspira aire del pozo.

El aire entra en el canal subterráneo a través de otros pozos que comunican dicha canalización con la superficie. Como el agua subterránea suele ser fría, el aire que pasa sobre ella se enfría eficazmente, de manera que la tasa de refrigeración de las torres eólicas que funcionan conjuntamente con canales subterráneos de agua es sumamente elevada. También en este caso el aire del foco de arrastre



LOS RESPIRADEROS se usan en zonas en las cuales los vientos polvorientos no permiten el uso de torres eólicas. Un respiradero es un agujero abierto en el ápice de un techo semiesférico o cilíndrico. Las aberturas hechas en la sobrecúpula que protege el respiradero dirigen el viento que pasa por él. Cuando el aire pasa sobre una superficie curva, aumenta su velocidad y disminuye su presión en el ápice de dicha superficie. En el caso de un techo curvo, la menor presión externa en el ápice hace salir por el respiradero el aire caliente acumulado bajo el techo. De este modo se mantiene una corriente de aire en la habitación cubierta por el techo. Los respiraderos se colocan sobre la sala de estar; bajo ellos se sitúa una piscina para enfriar el aire circulante por la habitación.



LA CISTERNA se llena con agua fría durante las noches de invierno de las regiones áridas de Irán, cuando la temperatura suele estar sólo unos grados por encima del punto de congelación. Las torres eólicas que rodean la cisterna mantienen fría el agua para su uso durante los cálidos meses estivales. Cuando el sol calienta el techo abovedado de la cisterna, se calienta el aire que discurre sobre el agua de la cisterna y aumenta su tasa de evaporación. Las torres mantienen una corriente de aire sobre la superficie del agua, con lo cual se extrae el vapor de agua, se impide la saturación y puede continuar la evaporación. Las capas más profundas del agua se calientan poco, porque casi todo el calor del aire se emplea en evaporar el agua superficial. Cuando el techo de la cisterna está provisto de un respiradero, el viento desciende por las torres, sopla sobre el agua y asciende y sale a través del respiradero (*flechas negras*), arrastrando aire cargado de vapor procedente de la cisterna. Cuando no hay respiradero, el viento baja por las torres y es obligado a ascender por las canalizaciones del costado de sotavento de las torres (*flechas de color*). La corriente ascendente creada en dichas canalizaciones arrastra aire humedecido por la cisterna, haciéndolo salir por las aberturas de sotavento de las torres. La cisterna está parcialmente hundida, para aprovechar las propiedades aislantes del suelo. Un techo abovedado se enfría con más facilidad que otro plano.

es tan frío, que a menudo se almacena alimentos cerca de la boca del pozo. El enfriamiento es eficaz incluso en noches sin viento, cuando la torre funciona como una chimenea; el aire del exterior pasa sobre el arroyo subterráneo, en donde sufre un enfriamiento sensible y evaporativo, y luego es aspirado, a través del pozo, hacia el interior de la casa. Se mezcla con el aire del sótano y sale finalmente por el ápice de la torre.

El problema de las torres eólicas es que dejan entrar polvo, insectos y pájaros al edificio. Las torres más nuevas están provistas de mallas que, al menos, impiden la entrada de insectos y pájaros. Por las torres de mayor altura entra menos polvo, pero su construcción y mantenimiento son costosos. Otra manera de impedir la entrada del polvo es hacer más ancha la base de la torre. Al aumentar la sección transversal de la corriente de aire, disminuye la velocidad del viento en la parte inferior de la torre, lo que permite que el polvo se asiente en repisas llamadas bolsillos de polvo. El modo de situar las aberturas en el ápice de la torre puede regular también la infiltración del polvo; en zonas en donde los vientos polvorientos soplan en una dirección y los vientos sin polvo soplan en la opuesta, las aberturas se disponen en consecuencia. De modo análogo, en zonas en donde hay vientos predominantes, las aberturas están situadas como para aprovecharlos.

Las torres eólicas continúan usándose en Irán y hasta se cuenta con ellas en algunas edificaciones nuevas. Ciertamente están destinadas a ser usadas sólo en verano y deben estar adecuadamente cerradas en invierno. Así, en Bam las torres se obturan con murallas de fino grosor. Si no se las cierra en invierno, aumentan muchísimo las pérdidas de calor por infiltración, es decir, las pérdidas hacia el frío aire ambiente que se haya colado dentro del edificio.

Las torres eólicas pueden emplearse conjuntamente con techos curvos, los cuales son otra fuente de bienestar en el cálido clima estival de Irán. Los techos curvos (semiesféricos o cilíndricos) ofrecen muchas ventajas respecto de los techos planos. Su resistencia estructural es de por sí mayor, por lo cual pueden hacerse más livianos y no precisan vigas



TECHO ABOVEDADO Y TORRES EOLICAS de una cisterna en la ciudad de Yazd. Las torres tienen 12 m de altura; la cisterna mide 12 m de profundidad y su capacidad es de unos 1000 m^3.

de madera, que escasean en las regiones desérticas. Además, el aire caliente que se recoge bajo un techo curvo está muy por encima de la zona habitable de la habitación cubierta por él. De este modo se mantiene más agradable la temperatura de la habitación, y se limita el paso de calor del techo a ésta, porque cerca del techo existe una elevada temperatura.

Todo techo absorbe calor solar directamente por radiación; los techos llanos y curvos de igual superficie de base absorben aproximadamente la misma cantidad de radiación solar. Pero un techo pierde la mayor parte de su calor, no por radiación, sino por convección; es decir, la principal pérdida de calor depende del movimiento del aire que entra en contacto con el techo. Un techo curvo posee una mayor superficie para la transmisión del calor por convección y transmite calor con mayor eficiencia que otro plano. Por consiguiente, un techo curvo se enfría con mayor facilidad.

Un techo curvo es más eficaz si posee respiraderos. El funcionamiento de un respiradero se basa en el hecho de que cuando el aire pasa sobre un objeto cilíndrico o esférico, aumenta su velocidad en el ápice del objeto, por lo que disminuye allí su presión. Si en el ápice de un techo semiesférico o cilíndrico hay un orificio, la diferencia de presión induce al aire caliente subyacente al techo a salir por el orificio.

Un respiradero suele estar protegido por una pequeña cúpula en la cual hay aberturas que dirigen el viento a través del respiradero. Como el funcionamiento del respiradero se funda en el paso del aire sobre una superficie curva, los techos provistos de respiraderos están orientados de manera que presenten la máxima curva al viento. En las zonas en donde hay un viento predominante, se constituyen techos cilíndricos de modo que el eje del cilindro sea perpendicular a la dirección del viento. En lugares en donde los vientos soplan en cualquier dirección, se emplean techos semiesféricos. Los respiraderos suelen disponerse sobre las salas de estar.

Un sistema de enfriamiento pasivo del tipo de cisterna incorpora varios otros sistemas pasivos. La cisterna es un depósito de 10 a 20 metros de profundidad, hundido en el suelo, cubierto por un techo semiesférico y rodeado por varias torres eólicas. En algunas zonas de las áridas llanuras de Irán, se lleva agua de las tierras altas mediante un sistema de acueductos subterráneos llamados qanats. La finalidad de la cisterna es mantener el agua a una temperatura razonablemente baja durante los cálidos meses de verano. En el diseño de la cisterna se aprovechan los cambios térmicos estacionales del desierto y las propiedades aislantes del suelo.

En las zonas áridas del Irán, las noches de invierno son muy frías. En invierno se llenan parcialmente las cisternas con agua fría. En verano, el techo semiesférico de la cisterna se calienta, como también el aire y la capa superior del agua. Pero antes de que se calienten los estratos más profundos del agua, el estrato superior se evapora y una corriente de aire, mantenida por las torres eólicas, se eleva arrastrando el vapor de agua. De este modo se mantiene fría el agua.

Un sistema de enfriamiento por cisterna funciona en una de dos maneras. Si está provisto de un techo semiesférico dotado de respiradero, el aire desciende por la torre eólica, pasa sobre el agua y sube, saliendo por el respiradero. La corriente de aire lleva bajo el techo la mezcla de aire y vapor de agua. Pero si la cisterna posee un respiradero, pueden caer polvo, insectos y otras materias, ensuciando el agua, por lo que ciertas cisternas se construyen sin respiraderos. En estas cisternas se establece un cortocircuito en la corriente de aire procedente de la torre: el aire baja por las canalizaciones del lado que da el viento, arrastrando la mezcla de aire y vapor de agua de la cisterna, induciéndolo a salir por las aberturas de sotavento de la torre. Actualmente no se usan mucho las cisternas de ambos tipos, porque si bien el agua que suministran es fría, está asimismo estancada y, por tanto, no es segura para el consumo humano directo.

Un sistema de cisterna funciona eficazmente acumulando energía de una estación a otra. Muchos sistemas pasivos de enfriamiento y calefacción funcionan según ese principio. Otro ejemplo lo constituye el sistema de hacer hielo, o congelador, tradicional en Irán. (Al igual que la cisterna, el congelador se ha descartado por motivos sanitarios.) En las regiones áridas de Irán, la temperatura nocturna del aire en invierno suele estar a pocos grados por encima del punto de congelación. Con un congelador puede fabricarse hielo en invierno y almacenarlo para el verano. El sistema se basa en las pérdidas por irradiación hacia el cielo en noches invernales, claras y frías.

El congelador consta de un gran pozo de almacenamiento, de 10 a 15 metros de profundidad, y de uno o más estanques rectangulares poco hondos, de 10 a 20 metros de anchura según un eje norte-sur y de varios centenares de longitud según un eje este-oeste. Al costado sur de cada estanque se levanta un muro de adobe, lo bastante alto como para dar sombra a todo lo ancho del estanque durante la temporada de fabricación de hielo. Unas paredes más bajas, en los extremos oriental y occidental del estanque, protegen a éste de la radiación solar de las primeras y últimas horas del día.

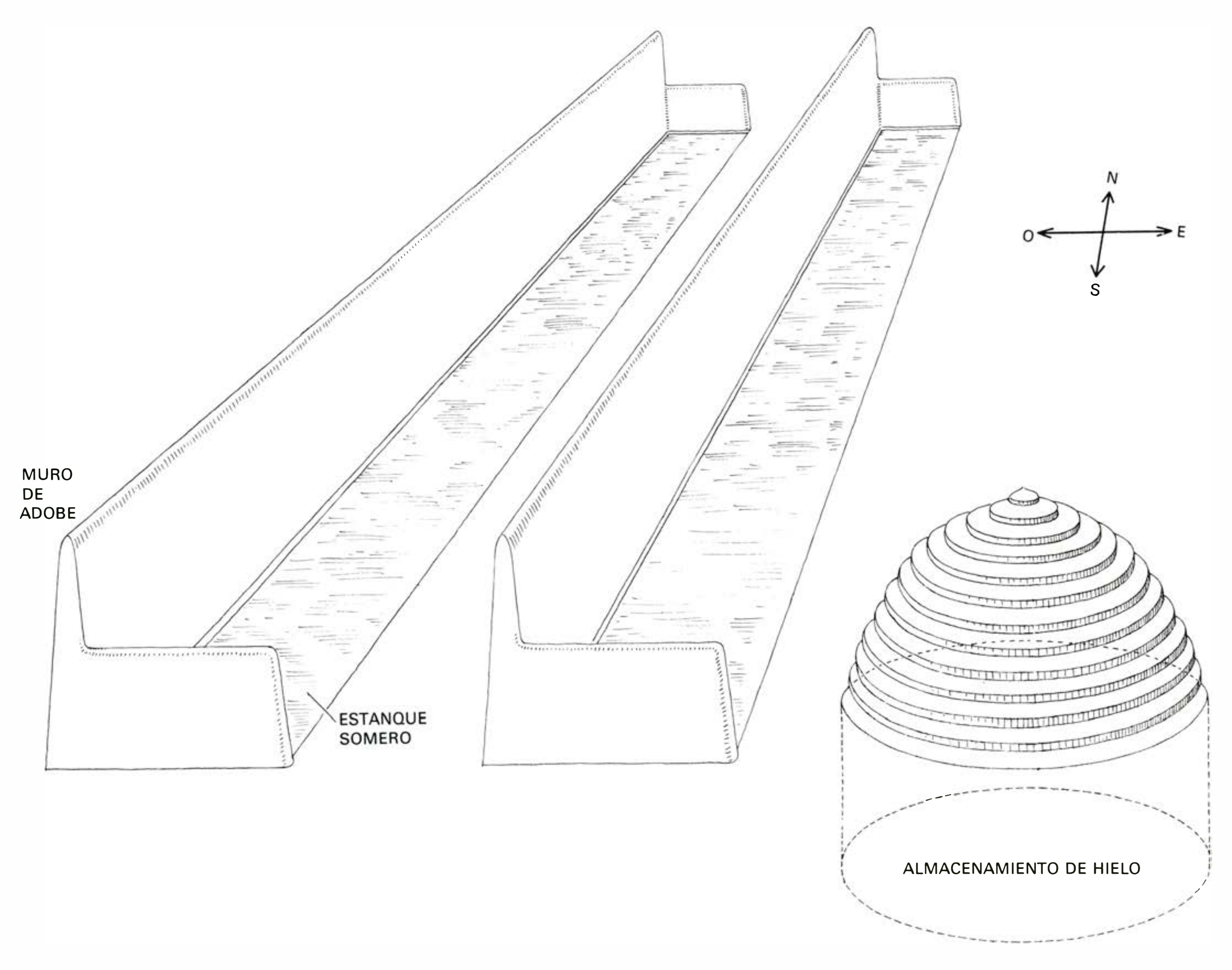
En las noches invernales despejadas se llena de agua cada estanque. En semejante estanque, el agua pierde calor hacia el

cielo por irradiación y recibe calor del aire por convección y del suelo por conducción. Pero los muros dispuestos a lo largo del estanque lo protegen del viento y, por tanto, aminoran la cantidad de calor ganada por convección. (Cuando hay varios estanques, sus muros paralelos mejoran el efecto global de apantallamiento.) En estas circunstancias, basta la pérdida de calor por irradiación hacia el cielo nocturno para congelar el agua del estanque.

Las condiciones meteorológicas determinan el espesor de la capa de agua que se puede congelar. En ocasiones el estanque se llena unos pocos centímetros cada vez durante la noche, lo que aumenta la velocidad de formación de hielo. Al día siguiente, el hielo se corta y se coloca en el pozo de almacenamiento. Mientras se realiza esta operación, los muros del estanque ayudan a impedir que el hielo se derrita al calor del sol del día. Por otra parte, el calor conducido por el suelo tiende a derretir el fondo del hielo, de manera que es fácil extraerlo.

Un sistema pasivo de enfriamiento aprovecha las características mismas del clima que intenta vencer. Por este motivo, los sistemas pasivos de enfriamiento y ventilación de Irán no pueden usarse al azar en otras regiones del mundo. Sin embargo, podrían funcionar satisfactoriamente en climas semejantes al de Irán. Por ejemplo, si bien en Irán se han descartado los sistemas de cisterna y de congelador por razones de salubridad, podrían emplearse en dicho país y, en otros, para suministrar agua fría con fines que no fuesen su consumo directo por la población.

En los climas en que los sistemas iraníes de enfriamiento pasivo no puedan aplicarse, debería examinárselos con interés de todos modos. Demuestran la posibilidad de trabajar a favor del medio ambiente exterior y no en su contra. Será preciso que, en el futuro, los arquitectos e ingenieros tengan más en cuenta el clima, y bien les valdría examinar las posibilidades que presenta para sistemas pasivos de calefacción, enfriamiento y ventilación. Con esta información deberían poder proyectar edificios que contaran con las comodidades modernas y, sin embargo, consumieran cantidades mínimas de energía.



EL CONGELADOR es un sistema pasivo de enfriamiento que aprovecha las temperaturas de las noches invernales del desierto, cercanas a la de congelación del agua. Varios estanques someros, de 10 a 20 metros de anchura en sentido norte-sur y varios centenares de metros en sentido este-oeste, se llenan con agua fría en las noches de invierno. Un alto muro de adobe en el costado sur de cada estanque y unos más bajos en los extremos este y oeste, protegen del viento a cada estanque. De noche, el agua del estanque pierde calor por irradiación hacia arriba y recibe calor del suelo por conducción y del aire por convección (es decir, por movimiento del aire sobre la superficie del agua). Los muros lo protegen del viento, por lo cual es menor el calor adquirido por convección; así, en las noches despejadas la pérdida de calor hacia el cielo por irradiación basta para congelar el agua. Al día siguiente se corta el hielo y se le coloca en un pozo almacenador cubierto, de 10 a 15 metros de profundidad. Los muros dan sombra el estanque durante el día, por lo cual el hielo no se derrite antes de que se pueda cortar y almacenar.

Juegos matemáticos

Donde se trata de los saltos de damas, del juego de amazonas, dados y otros jugosos pasatiempos

Martin Gardner

Los elementos utilizados habitualmente en los juegos familiares –como, por ejemplo, dados, piezas de ajedrez, damas, naipes, etcétera– han sido siempre fuente caudalosa de problemas de matemáticas recreativas. Daré aquí algunos ejemplos recientes de problemas de esta categoría, problemas que he seleccionado por su variedad y elegancia. En su mayor parte serán resueltos en este mismo artículo, aunque retendré hasta el próximo número la solución de uno de ellos, y, la de otro, hasta recibir comunicaciones de los lectores al respecto.

Comenzaré con un problema de dados. ¿Es posible numerar las caras de un par de cubos de forma completamente distinta de la habitual, de tal manera que utilizando los cubos así numerados en un juego de dados cualquiera, las probabilidades de las jugadas sean exactamente iguales a las correspondientes con los dados ordinarios?

Que yo sepa, el primero en proponer y resolver esta cuestión fue el coronel George Sicherman, de Buffalo. El problema tiene solución; si se le asigna a cada cara un número entero positivo, la única solución posible es la mostrada por el extraño par de dados representados en la ilustración inferior. Es indiferente cómo se sitúen los números en las distintas caras. Sicherman los dispuso de forma que las caras opuestas del lado de la izquierda siempre sumen cinco en total, y, las del lado de la derecha, siempre sumen nueve.

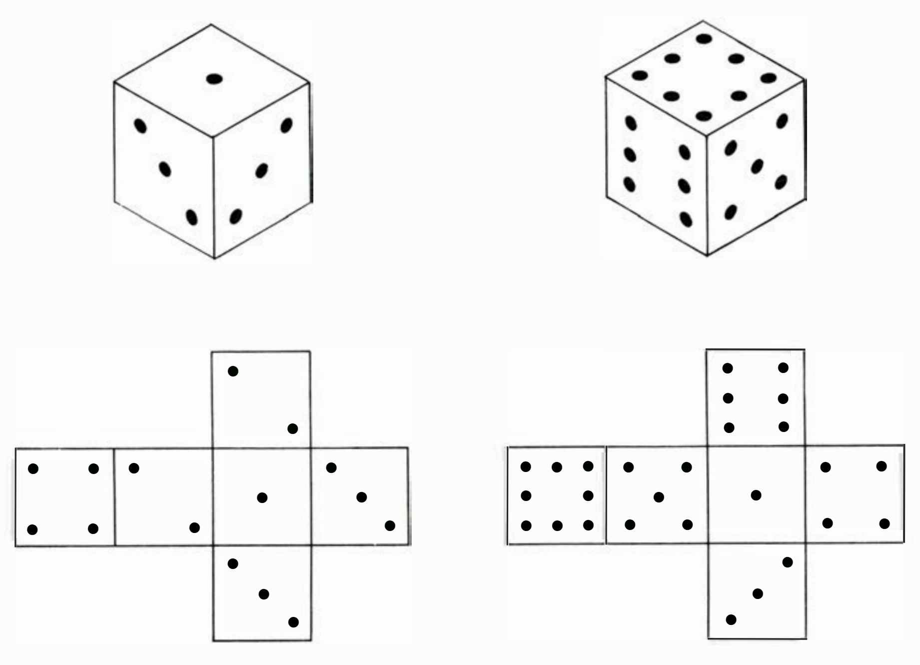
En la parte izquierda de la ilustración superior de la página siguiente se muestra la conocida matriz que presenta todas las formas de obtener cada una de las puntuaciones, de 2 a 12, resultantes del lanzamiento de un par de dados ordinarios. Hay 36 pares de resultados posibles. Para determinar la probabilidad de que un lanzamiento produzca una suma n dada se cuenta el número de veces que n figura en la tabla, y se divide entre 36. Por ejemplo, la carta contiene tres veces al número 4, por lo que la probabilidad de lanzar una suma de cuatro puntos es de 3/36, o sea, 1/12. En el lado derecho de esa misma ilustración se presenta la correspondiente carta para los dados de Sicherman, que demuestra que la probabilidad de cada suma es idéntica a la de los dados habituales. Sería posible utilizar en un casino los dados de Sicherman en las mesas de juego, sin alterar ni las reglas de apuestas ni el porcentaje de la casa, aunque quizá resultase difícil convencer a los habituales de que las probabilidades permanecerían invariables.

La demostración de que no existe ningún otro modo de construir una tabla como la anterior utilizando enteros positivos requiere algún trabajo, por lo que no entraré ahora en más detalles. Sicherman descubrió también que es imposible rediseñar tres o más dados que tengan iguales probabilidades que los ordinarios sin utilizar los dos suyos. Por ejemplo, el par de Sicherman más un dado ordinario dan las mismas probabilidades que tres dados corrientes, dos pares de dados de Sicherman se comportan como cuatro dados habituales, y así sucesivamente.

La disposición habitual de los números de los dados usados en Europa y América consiste en que las caras opuestas suman siete, y los números 1, 2, 3 rodean en sentido antihorario uno de los vértices. Se ha sacado partido de esta disposición en muchos acertijos y trucos de magia, y se han hecho ciertos pinitos de numerología. Las cuatro aristas de cada cara de un dado representan las cuatro estaciones. El total de doce aristas simboliza los doce meses del año. Cada dado contiene tres pares de dígitos que suman siete, número de días de la semana. Además, sumando $7 \times 7 \times 7$ con $7 + 7 + 7$ resulta $343 + 21$, o sea, 364. Sumando una unidad más, correspondiente al dado, resulta 365, que es el número de días del año.

Al sostener un dado pueden ser visibles una, dos, o tres de sus caras. ¿Es posible girar el dado de distintas formas, de tal manera que la suma de los números visibles vaya dando cada uno de los números de 1 a 15? Curiosamente, sólo es imposible obtener el nefasto número 13. Multiplicando 13 por 4 (ya que hay cuatro vértices en cada cara) resulta 52, que es el número de semanas del año.

Karl Fulves, de Nueva Jersey, mago, escritor y especialista en ciencias de la computación, ha inventado hace poco un truco muy original de percepción extra-



Dados de Sicherman

sensorial, basado en la disposición de los dígitos en el dado. El mago pasa el dado a un espectador, se vuelve de espaldas y da las siguientes instrucciones. Se le pide al sujeto que coloque el dado en una mesa, sin que importe qué cara queda hacia arriba. Si el número de esta cara es par, el espectador ha de darle al dado un cuarto de vuelta hacia el este (hacia su derecha). Por el contrario, si dicho número es impar, el dado debe volverse un cuarto de vuelta hacia el norte (esto es, alejándolo de sí). El procedimiento se repite sucesivamente, obedeciendo siempre a la regla: girar hacia el este si la cara superior es par, girar hacia el norte si la cara superior es impar. Cada vez que el sujeto vuelve el dado dice, en voz alta, "Vuelta". Evidentemente, el espectador no revela ni el número inicial de puntos ni los sucesivos.

Tras darle unas cuantas vueltas al dado el mago le ruega al sujeto que se detenga tan pronto aparezca el 1 en la cara superior. Se le pide entonces al sujeto que vuelva el dado una vez más (ajustándose a la regla) y que, realizado esto, se concentre en el número resultante. Parece evidente que hay cuatro posibilidades para este número. No obstante, y a pesar de seguir de espaldas, el mago sabe dar la respuesta exacta.

Basta un poco de práctica para revelar el secreto. Tras dar como máximo cinco vueltas, el dado entra en la secuencia cíclica 1-4-5-6-3-2, 1-4-5-6-3-2,... Así pues, el número siguiente al 1 siempre será el 4. En realidad, el dado comienza la serie de repeticiones antes de tres vueltas, excepto cuando se sitúa inicialmente con el 6 arriba y el 5 mirando hacia el sujeto.

Hace ya varios años que recibí de Christer Lindstedt, corresponsal en Suecia, el siguiente problema combinatorio. Imaginemos un dado de tres por tres por tres construido con 27 dados ordinarios. En tal configuración hay 54 pares de caras mutuamente enfrentadas. Multipliquemos los pares de números así enfrentados, y sumemos después los 54 productos resultantes. ¿Cuál es el mínimo valor de la suma que puede obtenerse construyendo adecuadamente el dado? ¿Cuál es su valor máximo? No conozco la solución de ninguna de estas cuestiones, y tampoco imagino ningún método eficaz para contestarlas sin auxilio de un ordenador. Los lectores interesados en el problema no deberían dejar de enviarme sus mejores resultados. Aunque no podré acusar recibo de todas las cartas, sí daré cuenta más adelante de las más atinadas. En este momento, ni siquiera conozco con certeza las

	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
2	3	4	5	6	7	8
3	4	5	6	7	8	9
4	5	6	7	8	9	10
5	6	7	8	9	10	11
6	7	8	9	10	11	12

	1	2	2	3	3	4
1	2	3	3	4	4	5
3	4	5	5	6	6	7
4	5	6	6	7	7	8
5	6	7	7	8	8	9
6	7	8	8	9	9	10
8	9	10	10	11	11	12

Tablas de probabilidades de dos dados ordinarios (**izquierda**) *y de los dados de Sicherman* (**derecha**)

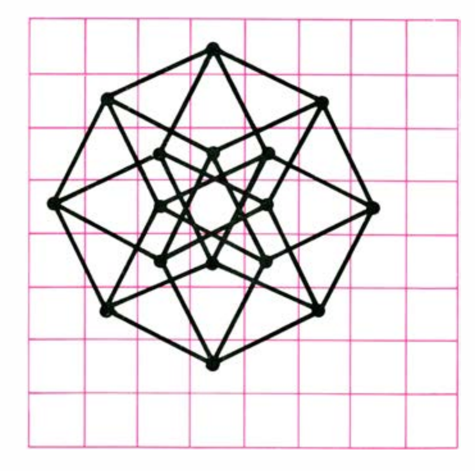
sumas máxima y mínima correspondientes a un cubo de ocho dados. Hasta ahora, los mejores resultados que he obtenido han sido 306 y 40.

He aquí un problema poco conocido de damas, que plantea un bonito rompecabezas en un caso particular. El caso general todavía no ha sido resuelto. ¿Pueden situarse en un tablero de cinco por cinco casillas, cinco damas de un color y tres de otro de forma que ninguna dama de un color pueda atacar a ninguna de otro bando? Puede ser conveniente dibujar el tablero en papel, y usar, en lugar de damas, peones de ajedrez o monedas. Sorprendentemente, y salvo giros o simetrías, solamente hay una solución de este problema. Para no privar al lector del placer de hallar la solución, no la daré este mes sino en el próximo número.

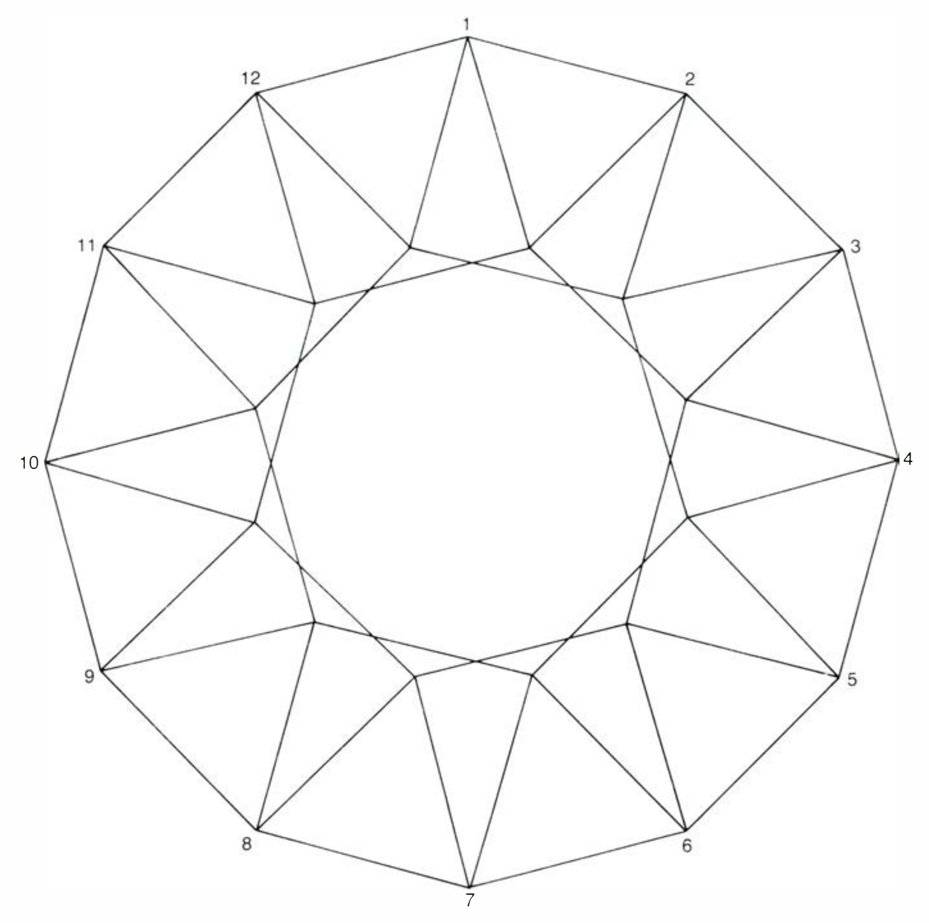
Resulta imposible situar en el mismo tablero de orden cinco (que tiene cinco casillas de lado) cinco damas de forma que haya más de tres casillas no atacadas, y también es imposible situar tres damas de forma que haya más de cinco casillas no atacadas. Este hecho sugiere un problema más general. Dado un tablero de orden n y dadas k reinas del mismo color, ¿cuál es el número máximo de casillas no amenazadas que puede obtenerse situándolas adecuadamente? Como es obvio, en las casillas no amenazadas podrían colocarse reinas del otro color, por lo que el problema equivale a preguntar cuál es el máximo número de, digamos por ejemplo, reinas blancas que pueden colocarse juntamente con k damas negras en un tablero de n por n casillas, de forma que ninguna reina de un color pueda amenazar a ninguna del otro.

En su enunciado general, el problema carece de sentido para tableros de órdenes 1 y 2, y es fácil ver que, en el de orden 3, situando la dama en un rincón o una de las casillas laterales se tienen dos casillas no amenazadas. Evidentemente, éste es el valor máximo. El problema comienza a ser interesante cuando n vale 4. Se desconoce si el problema tiene solución para k reinas en tableros de orden superior a 5, y parece difícil, si no imposible, hallar una fórmula que resuelva el problema general.

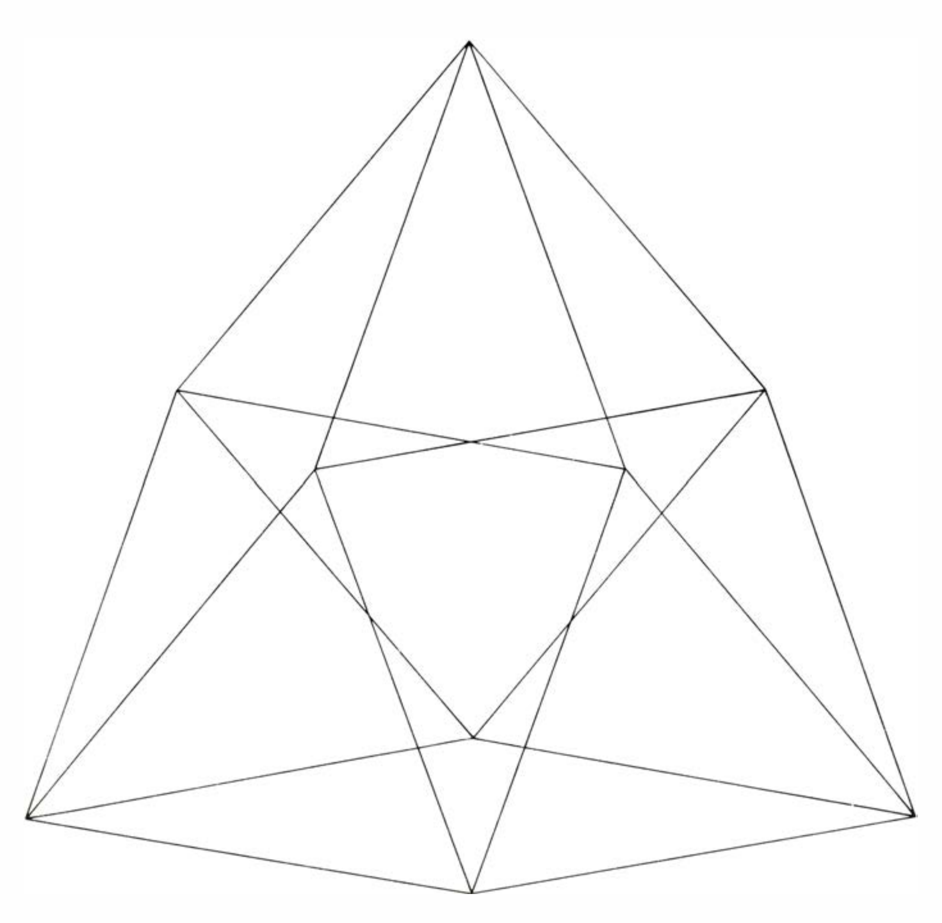
Hay docenas de problemas ajedrecísticos clásicos que utilizan caballos; se dan algunos en el capítulo 14 de la última recopilación de artículos aparecidos en esta sección, titulada *Mathematical Magic Show.* Scott Kim ha propuesto el siguiente problema de caballos, que yo no conocía. ¿Es posible colocar 16 caballos en el tablero ordinario de ajedrez de manera que cada uno de elllos ataque exactamente a otros cuatro? La ilustración inferior muestra la solución, bella por su simetría. Las líneas negras, que ponen



Una solución hipercúbica del problema de caballos de Kim



Una solución con 12 cuadrados del problema de Richard J. Laver


Proyección de un símplice tetradimensional que resuelve un problema de triángulos

de manifiesto todas las amenazas mutuas, forman una proyección planar del esqueleto de un hipercubo.

Jan Mycielski, matemático de la Universidad de Colorado, me escribió en abril de 1977 para preguntarme si el siguiente problema, propuesto por su colega Richard J. Laver, es nuevo: ¿Puede trazarse en el plano una colección finita de cuadrados de igual tamaño, de forma que todo vértice de todo cuadrado sea también vértice de por lo menos otro cuadrado? Los cuadrados pueden ser rampantes, esto es, pueden tener zonas de solapamiento. Mycielski había encontrado un conjunto de 576 cuadrados que satisface las condiciones del problema, y se preguntaba si podría rebajarse tal número. Poco más tarde, me informaba él mismo que otro colega había encontrado una solución con 40 cuadrados, y algo después, que otros dos colegas suyos habían, independientemente uno del otro, disminuido el número a sólo 12 *(véase la ilustración superior de la izquierda).* Finalmente, Andrzej Ehrenfeucht, profesor de ciencias de la computación en la misma universidad, obtuvo una solución con ocho cuadrados.

El pasado mes de octubre le conté el anterior problema a Kim, aunque sin hacer mención de ninguno de los anteriores resultados. Me dejó desconcertado al contestar instantáneamente: "Puede hacerse con ocho". Evidentemente, se había dado cuenta de que su problema de los 16 caballos de ajedrez resuelve con ocho cuadrados el problema de Laver. Es seguro que no existen soluciones de menos de ocho cuadrados, pero no dispongo de ninguna demostración de ello. En tres dimensiones el problema se resuelve fácilmente con tres cuadrados. En el plano es posible situar seis triángulos equiláteros de forma que cada vértice pertenezca a dos triángulos y en cambio no haya ningún lado que pertenezca a dos triángulos distintos *(véase la ilustración inferior de la izquierda).* No es sorprendente que la solución sea la proyección planar del símplice de dimensión cuatro, que es en cuatro dimensiones el análogo del tetraedro regular en dimensión tres.

David L. Silverman, que es autor de *Your Move* (espléndida colección de problemas basados en juegos), inventó un original juego de tablero, no incluido en su libro, que utiliza una pieza de ajedrez de fantasía llamada por lo común "amazona". La amazona reúne en sí los movimientos de la dama y del caballo. El juego de Silverman se desarrolla sobre un tablero ordinario de ajedrez, y utiliza dos

amazonas y cierto número de fichas. Pueden usarse damas de ajedrez para representar las amazonas, pero es importante recordar que tales piezas tienen también movimientos de caballo.

Las blancas abren el juego, situando su amazona en una casilla cualquiera. A continuación, el negro sitúa la suya en cualquier casilla no amenazada. Los jugadores actúan alternativamente, consistiendo cada jugada en llevar su amazona a cualquier casilla libre no amenazada por la otra. El desplazamiento de las amazonas no tiene por qué atenerse a los movimientos de dama o caballo: sencillamente, es transportada a cualquier casilla libre no amenazada. Tras efectuar un movimiento, la casilla recién abandonada se ocupa con una ficha, por ejemplo, una moneda de peseta. Las casillas así ocupadas quedan definitivamente inutilizadas para el juego, no pudiendo ser ocupadas por ninguna amazona, pero no bloquean ninguna línea de ataque. Conforme avanza el juego, el tablero se va llenando de monedas, hasta que finalmente uno de los jugadores ya no puede hallar una casilla segura para su amazona. El último jugador que mueva gana la partida.

Si el juego de amazonas de Silverman se juega en tablero de orden cinco, el primer jugador vence inmediatamente sin más que ocupar el centro del tablero. Como todas las casillas están amenazadas desde dicho punto, el segundo jugador no puede siquiera colocar su amazona en el tablero. En el tablero ordinario de ajedrez, el segundo jugador puede ganar siempre utilizando una ingeniosa estrategia de aparejamiento descubierta por el propio Silverman. Se divide mentalmente el tablero en cuatro rectángulos de ocho por dos, y se numeran las casillas de cada rectángulo como se indica en la ilustración superior de la derecha. (En cada rectángulo aparece dos veces cada uno de los números de uno a ocho.) Tras cada jugada de las blancas, las negras ocupan sencillamente la casilla que está en el mismo rectángulo, y que tiene el mismo número, que la casilla ocupada por el blanco. El juego constituye un excelente ejemplo de la extraordinaria potencia de una estrategia de aparejamiento muy sencilla, con la que se puede ganar en un juego en apariencia muy difícil de analizar. Evidentemente, la estrategia de aparejamiento es también aplicable a todos los tableros de orden par mayor que cuatro; y es fácil preparar una estrategia de emparejamiento ligeramente más complicada que da victoria al primer jugador en todos los tableros de orden impar mayor que cinco.

El libro de Ross Honsberger *Mathematical Gems II* contiene una colección de problemas tan apasionante como su volumen anterior, y revela por primera vez un sobresaliente resultado de saltos de damas, descubierto por el matemático John Horton Conway, de la Universidad de Cambridge. Imaginemos un tablero ordinario del juego de damas, dividido en dos como muestra la ilustración inferior de la derecha. La mitad inferior del tablero está sombreada, y las filas de la parte no sombreada están numeradas (de abajo hacia arriba) de 1 a 4. Imaginemos ahora que hubiera una quinta fila adosada al borde superior. Si una dama rebasase este borde al saltar, se diría que ha saltado a la fila 5.

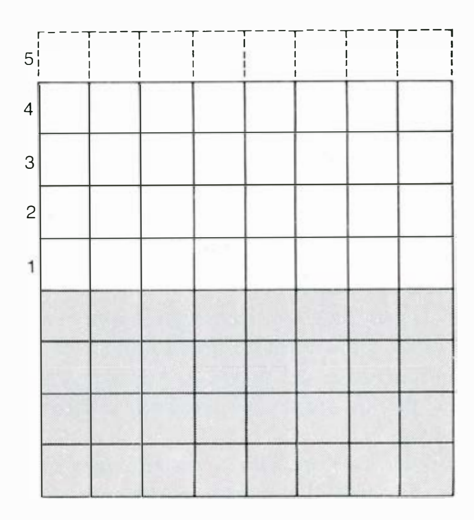
Todos los saltos han de ser ortogonales, es decir, horizontales o verticales, pero nunca diagonales. Lo mismo que en el juego de damas ordinario, al saltar sobre una pieza, ésta es "comida", y se retira del tablero. El problema consiste en determinar el mínimo número de damas que pueden ser situadas en la parte sombreada del tablero de forma que una sucesión de saltos llegue a colocar una pieza en la fila *n*.

Es evidente que para colocar una pieza en la fila 1 el número mínimo de damas a utilizar es dos, situadas como se muestra en la parte superior izquierda de la ilustración de la página siguiente; basta entonces con un salto. Para llegar hasta la fila 2 el mínimo número de damas es de cuatro. Pueden situarse como se ve en la parte superior derecha en dicha ilustración. La dama en posición más inferior salta hasta la fila 1, y a continuación, la situada a la extrema izquierda, da dos saltos, acabando en la fila 2. Para alcanzar la fila 3 es necesario colocar ocho piezas en las posiciones iniciales que se muestran en la parte inferior izquierda de esa misma ilustración. Hasta ahora los números mínimos de piezas necesarias iban duplicándose en cada paso, pero en adelante tal progresión se rompe. Hacen falta por lo menos 20 piezas, que pueden disponerse como se ve en la parte inferior derecha de la ilustración. Las flechas indican cómo empiezan los saltos, y no debería resultar difícil encontrar la forma de continuar hasta alcanzar con una dama la fila 4.

¿Cuántas piezas son necesarias para alcanzar la fila 5, es decir, para que una dama salte fuera del tablero? Sorprendentemente, no existe forma alguna de colocar damas en las casillas sombreadas que permita llegar con una de ellas hasta la fila 5. En realidad, la situación es más desesperada de lo que pudiera pensarse. No importa cuán hacia abajo, derecha e izquierda, se amplíe la región sombreada: ninguna disposición de las piezas, por grande que sea, podrá proyectar una pieza hasta la fila 5. Los lectores interesados en la cuestión podrán encontrar la ingeniosa demostración de imposibilidad diseñada por Conway en el capítulo 3 del libro de Honsberger.

1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	1	2	3	4
1	2	3	4	5	6	7	8
5	6	7	8	1	2	3	4

Estrategia de emparejamiento del juego de amazonas



Problema de damas de John Horton Conway

Volviendo la atención hacia los juegos de naipes, hay tantos nuevos trucos y rompecabezas inspirados en principios matemáticos que resulta angustioso tener solamente espacio para uno de ellos. Hace unos cuantos años, Martin D. Kruskal, físico de la Universidad de Princeton, hizo un extraño descubrimiento hoy conocido entre los magos dedicados a trucos de cartas con el nombre de principio de Kruskal.

Como mejor se explica el principio es describiendo el truco al que Kruskal lo aplicó inicialmente. El sujeto baraja un

mazo de naipes, y después piensa un número cualquiera de 1 a 10. A continuación, reparte las cartas lentamente desde arriba, colocándolas boca arriba en pila. Conforme reparte, el sujeto va contando para sí, observando el valor de la carta que reparte al llegar al número que ha elegido.

Supongamos que se pensó en el número 7, y que el valor de la séptima carta sea un 5. Sin alterar el ritmo con que va dando las cartas, mentalmente llama "1" a la próxima carta, y según reparte, va contando para sí hasta 5. Supongamos que la quinta carta sea un 10. Lo mismo que antes, la carta siguiente se llama "1", y continúa repartiendo y contando para sí hasta 10. El procedimiento se repite hasta que se hayan dado la totalidad de las 52 cartas. Las cartas finales de cada cuenta parcial, que determinan hasta dónde ha de proseguir la cuenta siguiente, se llaman "cartas clave". La última carta clave de la serie de recuentos anterior ha de ser recordada por el sujeto del mago. Es la "carta elegida", seleccionada por el procedimiento de recuento aleatorio anterior.

Desde luego, es improbable que el recuento final termine precisamente en la última carta del mazo; lo más verosímil es que sea imposible terminar el último recuento.

Hay que prevenir al sujeto para que vaya dando las cartas lentamente, con ritmo regular, no sea que al dudar descubra cuáles son las cartas clave. Aunque el recuento final vaya a quedar incompleto, es necesario recordar la última carta clave, y terminar de dar los naipes, para no descubrirla.

Para facilitar el recuento, explica el mago, se da el valor 5 a todas las figuras. Así pues, si una cuenta termina, por ejemplo, en una reina, el próximo recuento no va hasta 12 sino sólo hasta 5. Para aclarar más el procedimiento, la ilustración de la página siguiente muestra una cadena típica, en la que se han indicado todos los valores de las cartas clave. El sujeto comenzó pensando en un 4. La carta elegida, que ha de recordar, es la sota de corazones. Tiene valor 5, pero como tras ella quedan solamente tres cartas, es imposible completar la última cuenta. Es evidente que este procedimiento, realizado con un mazo bien barajado, puede seleccionar como carta clave cualquiera de las diez últimas.

Terminado el recuento, y sabiendo el sujeto la carta que ha de recordar, el mago toma el mazo de cartas, elige una entre las diez últimas, y la coloca boca abajo sobre la mesa. El sujeto dice entonces cuál es su carta, se vuelve la carta del mago, y, *probablemente,* resulta ser la carta elegida.

He escrito "probablemente" en cursiva para subrayar el curioso modo en que el truco de Kruskal se distingue de todos los demás trucos en que el mago descubre una carta seleccionada. En este truco, el mago no puede conocer la carta con seguridad absoluta. La probabilidad de que adivine la carta es de aproximadamente 5/6.

Veamos ahora en qué consiste el curioso secreto. Conforme el sujeto va dando cartas, el mago se fija en cualquier carta de valor claramente bajo entre las primeras que se reparten. El mago se sirve de esta carta como primer paso de una cadena que va contando para sí mientras el sujeto cuenta la suya. La intuición de Kruskal consistió en darse cuenta de que, aproximadamente cinco veces de cada seis, la última carta clave de la cadena del mago será la misma que la última carta de la cadena del sujeto.

Dicho de otra forma, hay una probabilidad de alrededor de 5/6 de que dos cadenas comenzadas arbitrariamente se intersequen en una carta clave. Una vez que esto ocurre, las dos cadenas serán idénticas desde ese punto en adelante.

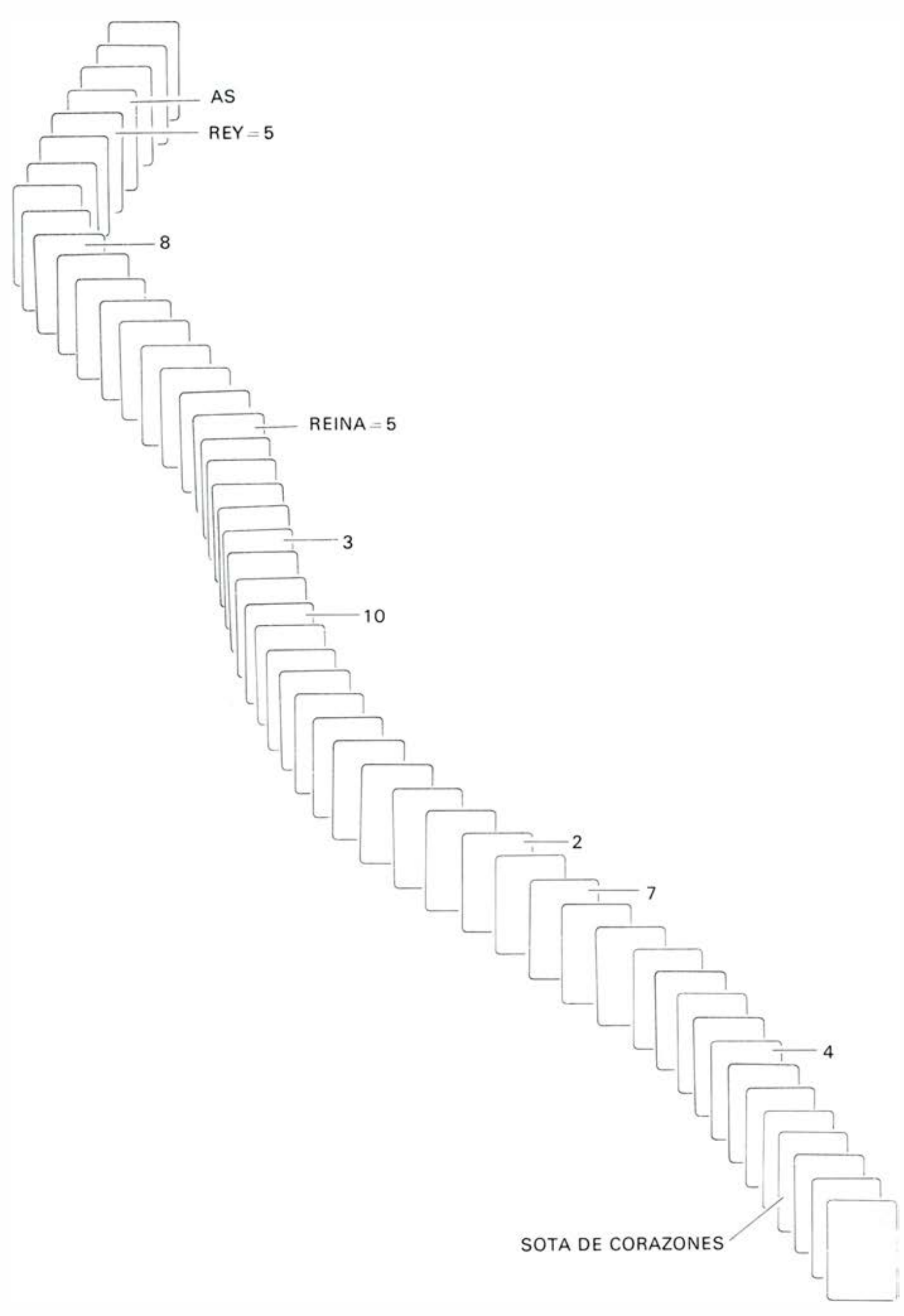
Al darles a las figuras el valor cinco, aumenta el número de cartas clave de las cadenas, y, por consiguiente, aumenta la probabilidad de intersección. Al empezar su cuenta en una carta baja de las primeras que salgan (en lugar de tomar un número cualquiera de uno a diez) el mago hace aumentar ligeramente el número probable de cartas de su cadena, con lo que aumenta una pizca la probabilidad de éxito. Realizando el juego con dos mazos de cartas, barajadas conjuntamente el fallo es sumamente improbable.

Una de las mejores variantes del truco de Kruskal es debida a Cy Endfield, de Londres. Se realiza el truco en la forma ya descrita, presentándolo como una proeza telepática. Cuando el mago separa la carta que (probablemente) ha seleccionado el sujeto, se fija en la situada inmediatamente debajo. Si esta carta es lo suficientemente baja como para que aún pueda efectuarse otro recuento, el mago continúa silenciosamente su cuenta, sin olvidar la última carta clave. La carta separada no se devuelve al mazo.

El mago le pasa entonces a su sujeto el mazo formado por las 51 cartas restantes (sin barajarlo), y le pide que repita el truco, empezando esta vez con un número distinto. "Ahora", dice el mago, "intentaré saber cuál será la carta por precognición". El mago escribe su predicción en una hoja de papel, que se pliega y se deja aparte. Evidentemente, en ella se anota la carta en que se fijó. Como la estructura del mazo no se ha alterado, es probable (en la misma proporción de aproximadamente cinco a uno) que resulte ser la segunda carta elegida.

También sería posible programar un ordenador para que realizara el papel de médium. Se inscribirían en 52 tarjetas

Método para llevar una dama a las filas 1, 2, 3 y 4



Cadena típica de un truco basado en el principio de Kruskal

perforadas los nombres de las cincuenta y dos cartas. El sujeto baraja, selecciona una carta por el método de Kruskal y pone el mazo de fichas en la entrada de datos del ordenador. Se programa éste para que adivine la carta, y, al mismo tiempo, recuerde la carta que sea más probable que resulte elegida en caso de repetirse el truco. Si la primera conjetura es correcta, la ficha seleccionada se retira del mazo del ordenador, y se repite el truco usando esta vez un número inicial distinto. En esta ocasión, el ordenador imprime el nombre de la carta sin examinar el mazo.

Ni siquiera un ordenador acertará todas las veces; mas el hecho de que el truco no dé resultado en algunas ocasiones lo hace todavía más impresionante. Hace años, cuando Uri Geller falló al presentarse en el programa de televisión de Johnny Carson (Carson, que había sido mago, guardó cuidadosamente los materiales de la prueba antes de aparecer ante las cámaras), Merv Griffin manifestó que tal fracaso le demostraba que las facultades de Geller eran auténticas. Los trucos de magia, dijo Griffin, funcionan siempre. Todos sabemos cómo "La Fuerza" nos llega y nos abandona. ¿Por qué habría de controlarla mejor un robot psíquico que un humanoide?

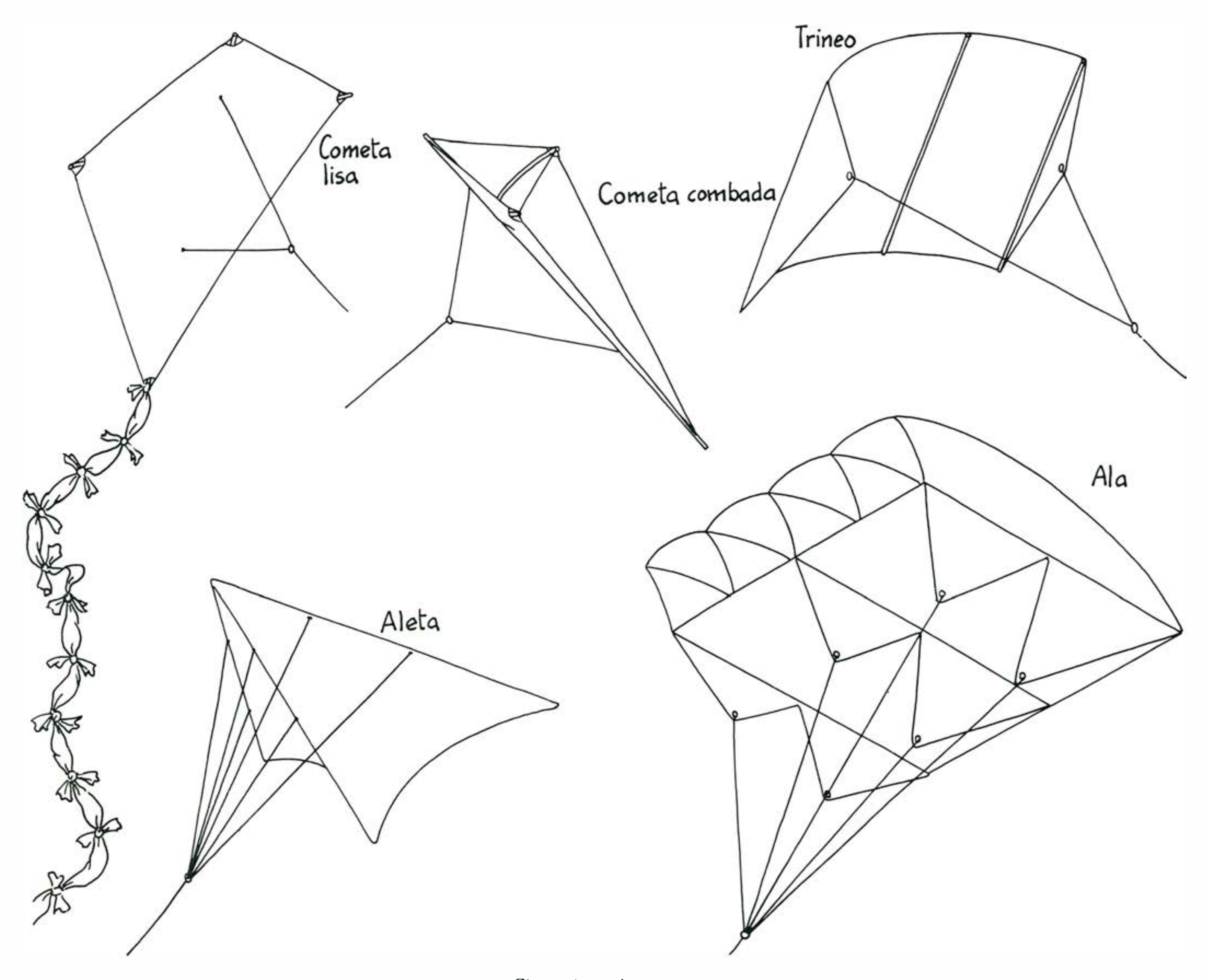
Taller y laboratorio

Presentación de las cometas Musha, de doble rombo y otras para construir y hacer volar

Jearl Walker

La primavera ha venido y con ella han llegado los vientos moderados, ideales para hacer volar cometas. La construcción de las mismas ha sufrido una pequeña revolución –al menos en el campo del aficionado– gracias a la introducción de nuevos materiales y herramientas que permiten construir cometas más resistentes y duraderas. A pesar de ello, tanto la técnica de la construcción como la del vuelo de cometas se encuentran aún en un estadio bastante experimental. No existe una ecuación simple por la que se pueda determinar taxativamente el ascenso y la estabilidad de una cometa: la fluidodinámica de la corriente de aire en la que se mueve la cometa es demasiado complicada como para tener solución, a menos que uno se meta a fondo en estudios muy sofisticados de aerodinámica. No se puede estudiar el tema de las cometas como si se tratara de un avión y hacerse incluso un modelo a escala reducida para ensayar en un túnel aerodinámico, donde determinar qué modelo de cometa será la que se eleve y permanezca estable. En el mundo del aficionado no hay más túnel aerodinámico que el propio viento de la naturaleza. Por ello, sin tener en cuenta que se esté construyendo un modelo patentado de un diseño básico u otro inventado por uno mismo, sólo hay un camino para saber si la cometa está bien hecha: que vuele.

El difunto C. L. Stong escribió una

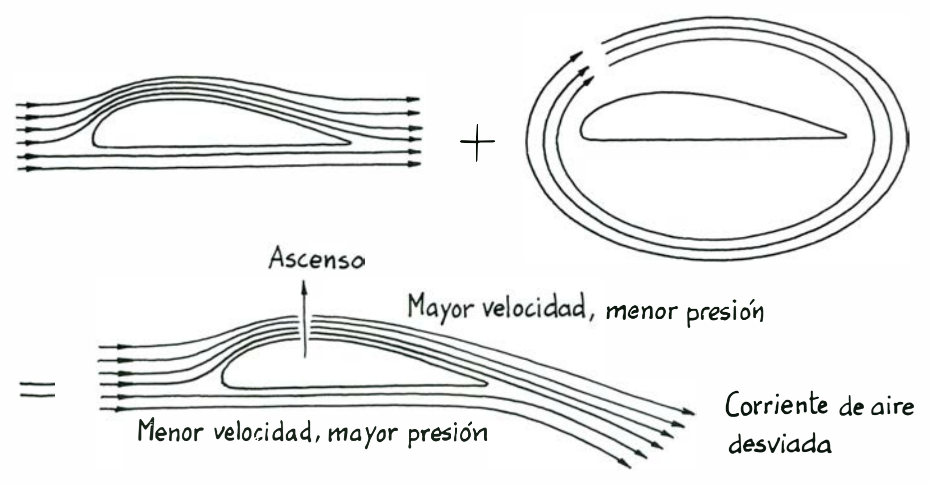


Cinco tipos de cometa

excelente introducción al tema de las cometas que se publicó en esta misma sección en abril de 1977. Recientemente se han editado varios libros buenos sobre las cometas donde se describen, con los diversos diseños, los nuevos materiales que se pueden emplear. Aquí expondremos la aerodinámica de la forma y del vuelo de las cometas, así como también unos cuantos modelos que no son difíciles de construir. Debido a la variada e interesante información que de ellos he recibido, estoy en deuda con Peter Pruden, de Cleveland, y con Judy Neuger. Las cometas, al igual que los diversos materiales para construirlas, pueden comprarse en las tiendas de artículos deportivos. Si conoce el inglés, puede confeccionarse una lista de las principales firmas expendedoras, que se anuncian en "Kite Lines", revista trimestral de la American Kitefliers Association, a la que se puede uno suscribir por 6 dólares al año (7106 Campfield Road, Baltimore, Md. 21207). Dicha publicación es buena tanto para los que se quieren iniciar en la técnica de fabricar y hacer volar las cometas, como para los que ya poseen gran experiencia en dicho campo.

La cometa no es una cosa divertida, a menos que pueda elevarse en el aire y lograr mantenerla allí estable o, por lo menos, controlada. La elevación que provoca la corriente de aire se debe a dos motivos: el primero es que la desviación que sufre dicha corriente al chocar contra la superficie de la cometa que se encuentra formando un determinado ángulo con la horizontal, empuja la cometa hacia arriba. La magnitud del impulso depende de la velocidad de la corriente de aire, es decir, del viento y del área de la proyección de la superficie de la cometa sobre el plano perpendicular a la dirección de dicha corriente de aire. Incrementando cualquiera de dichos factores, se aumenta el ascenso de la cometa. Sin embargo, cuando la desviación del viento es muy grande, la cometa presentará muchas dificultades para su manejo y puede llegar incluso a romperse. Si la velocidad del viento es muy grande, debe procurarse que el ángulo que forme la superficie de la cometa con la horizontal sea muy pequeño. En parte, la cometa autorregulará dicho ángulo y, en parte, se la debe ayudar regulando con las bridas o frenos que unen la cometa con la cuerda de amarre que sujeta a la misma.

El otro motivo que hace que la cometa se eleve es el mismo que hace subir a cualquier superficie flotadora. El movimiento de la corriente de aire que rodea la cometa puede considerarse como si tuviera dos componentes, uno dando vueltas alrededor de la cometa y otro no rotativo. En realidad, el movimiento de la corriente de aire, por lo menos de forma simple, se puede explicar como una superposición de los dos, con lo que resulta que la velocidad del aire es mayor por la parte de arriba de la superficie que por la de abajo. Esto provoca una diferencia de presión (a mayor velocidad menor presión) que hace que la superficie se eleve. Una cometa gana altura por el mismo sistema, aunque la aplicación del modelo simplificado de la corriente de aire puede no ser tan evidente.



Un modelo simple de líneas de corriente para un ala

Las inestabilidades de una corriente pueden ser de tres tipos: giros, cabeceos o desvíos. El giro es una rotación longitudinal, el cabeceo es una rotación lateral y la desviación es una rotación alrededor de un eje perpendicular a la superficie de la cometa. Para estabilizar el vuelo de una cometa, se pueden introducir varios trucos en su diseño. Además de una estructura equilibrada y de unas bridas apropiadas, está la cola, la cual puede tener forma curvada, de caja o bien aletas ya sea en la cara que dé al viento o en la posterior y abertura.

El armazón de la cometa debe estar perfectamente equilibrado para así conseguir un reparto simétrico del peso en toda la superficie de la misma que esté encarada con el viento. Si uno de los lados de la cometa pesa más que el otro, es casi seguro que el vuelo será enredado.

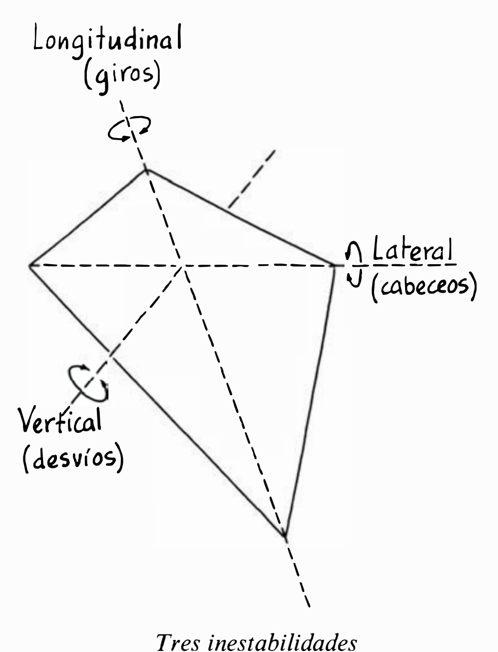
La brida es el conjunto de cuerdas que van desde la cometa hasta la cuerda de amarre. Algunas veces (aunque muy raramente) dicha brida es una cuerda simple (la cuerda de amarre de la cometa), en cuyo caso la definición es académica. Normalmente la brida consta de dos o más cuerdas atadas, por un extremo, a los puntos estratégicos de la cometa y, por el otro, unidas por un nudo común o por una pequeña argolla a la cuerda de amarre de la cometa. La función de la brida es distribuir la tensión de la presión del aire lo más posible, para dar estabilidad (bajo diversas circunstancias) y permitir, al que está dando vuelo a la cometa, maniobrar sobre ella.

La tracción combinada del conjunto de las cuerdas de la brida suministra una fuerza que contrarresta la resultante de las otras dos fuerzas que actúan sobre la cometa, que son, por un lado, su propio peso actuando hacia abajo y, por otro, la fuerza creada por la corriente de aire que actúa sobre la cometa en dirección ascendente, elevándola y haciéndola flotar graciosamente. Otra función de la brida es mantener a la cometa con un ángulo de ataque apropiado; dicho ángulo es el que forma la superficie de la cometa con la dirección del viento. En alguna ocasión, sobre todo con vientos fuertes, puede suceder que el ángulo de ataque de la cometa no sea el correcto. En este caso, la única solución es hacer bajar hasta el suelo la cometa para modificarla y ajustarle la brida. Algunas bridas tienen en la parte inferior de la cuerda un pequeño muelle o una banda de goma elástica, de manera que, cuando la velocidad del viento aumenta, el ángulo de ataque se ajusta automáticamente debido a que la misma presión del viento alarga la longitud del muelle o de la goma.

La cola suministra una estabilidad lateral y es necesaria en la mayoría de las cometas planas. Esta no debe ser ni demasiado larga ni demasiado corta; la longitud correcta sólo puede determinarse de forma experimental. Al añadirle

este lastre extra (básicamente como si fuera una prolongación del larguero) que es la cola, ésta responderá a los movimientos laterales de la cometa tirando de ella en dirección opuesta y, por tanto, anulando las oscilaciones laterales. La cola puede hacerse con trozos de tela unidos con una tira de papel o de plástico, o bien con un vasito o con varios vasitos dispuestos de manera que actúen como una chimenea haciendo pasar el viento a su través.

En el artículo de Stong mencionado se describía cómo usar los vasitos, a los que llama conos de viento. Fueron empleados por primera vez, como elementos estabilizadores del vuelo de las cometas, en el siglo XIX. Si los vasos se atan con la abertura estrecha hacia atrás, hacen pasar el viento hacia la abertura más pequeña, obligándole a aumentar su velocidad. La corriente de aire a la salida de esta especie de embudo tiene una velocidad mayor que el aire que lo rodea, lo que ayuda a mantener la orientación de los conos de viento. Algunas cometas tienen borlas laterales o bien dos colas en los extremos de la cruceta, en lugar de una sola cola, para conseguir una estabilidad longitudinal. Una gran parte de la estabilidad puede conseguirse por la forma de la cometa. Algunas cometas presentan al viento una superficie bien en forma de ángulo agudo o bien en forma de ángulo obtuso, al que se llama ángulo diedro. La cometa arqueada de Eddy, utilizada por primera vez por W. A. Eddy en 1897, es un ejemplo clásico de una cometa normal plana que ha sido arqueada hacia atrás para presentar al viento una superficie curvada. La estabilidad frente a las ráfagas de viento es proporcionada por el encorvamiento. Cuando la cometa se voltea ante una ráfaga repentina sobre una de las caras, la otra gira para presentar una mayor superficie al viento y de ese modo se ve sometida a una fuerza mayor, la cual evita que la cometa siga girando. La cometa de Eddy es tan estable a las ráfagas de viento que no necesita cola. Normalmente, la amplitud o magnitud del encorvamiento es ajustable, de suerte que se pueda lograr una mayor curvatura conforme aumente la velocidad del viento.



Tres inestabilidades

Otros modelos de cometas emplean aletas sobre la cara frontal o sobre la de detrás para mantener la cometa estable a las ráfagas de viento. Y hay modelos que tienen aberturas para dejar pasar el viento a su través sin impedimentos. Tales aberturas tienen varias funciones: reducir los tirones o arrastres de la cometa y, como consecuencia, el esfuerzo que tendría que soportar la persona que estuviera volando la cometa. También pueden ayudar a eliminar los remolinos provocados por el aire al pasar por los bordes de la cometa.

Tal vez el lector haya reparado alguna vez en la paradójica abertura de la mayoría de los paracaídas. Estos tienen un solo agujero en el centro. Los paracaídas empleados para detener lentamente los coches de carreras y para frenar el aterrizaje de los aviones poseen a veces unas aberturas de tanta superficie que parecen realmente dos bandas de tela cruzadas. Con un paracaídas sin agujeros o aberturas, se provocan remolinos alternativamente en una y otra cara del mismo, conforme el aire pasa por sus bordes. La presión del aire en los remolinos es menor que la presión del aire ambiente, de manera que el paracaídas se encuentra sometido a diferentes y periódicos cambios de presión en sus caras opuestas. El paracaídas comienza a balancearse y este balanceo aumenta en amplitud de forma similar a como lo hace el balanceo de un niño por empujones sucesivos del columpio.

Las oscilaciones pueden ser desastrosas para la carga sujeta al paracaídas. El aire, al pasar a través de las aberturas, rompe los remolinos y reduce así las oscilaciones. Las aberturas practicadas en algunas cometas tienen la misma finalidad. En las cometas pueden ser o bien unos simples orificios rectangulares o circulares o bien más disimulados, como los conseguidos por medio de la estructura celular de una cometa de caja.

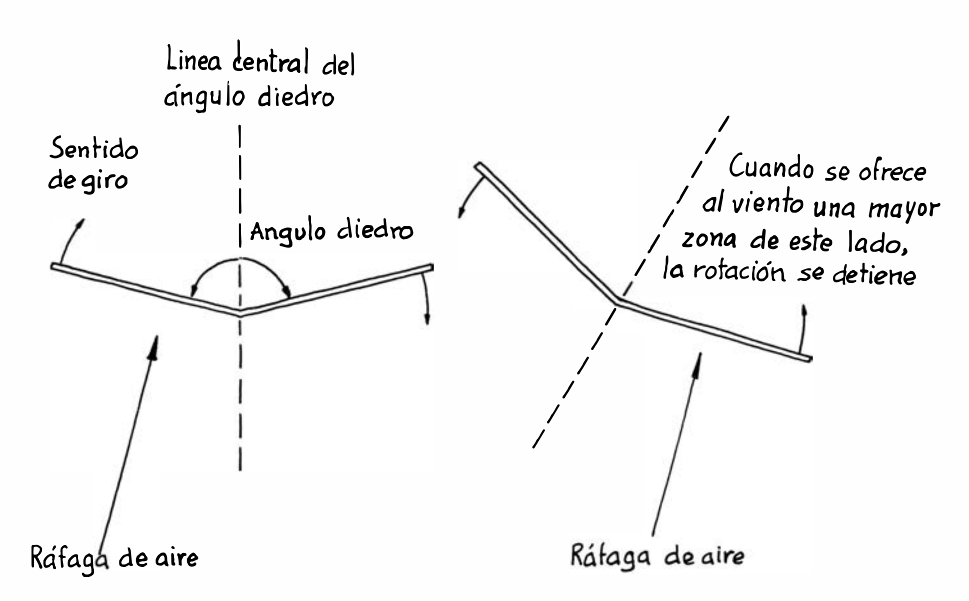
Se debe tener cuidado a la hora de elegir un lugar para hacer volar la cometa. El desvío ascendente del viento por el lado de barlovento de una colina puede ser beneficioso, pero no así la turbulencia que tiene lugar al otro lado. Por eso, es mejor hacer volar la cometa al pie de la colina a barlovento y no en la cima de la misma. Un terreno con relativa vegetación, como por ejemplo un parque, puede dar lugar a corrientes de aire caliente ascendente que ayuden a la cometa a elevarse. Una vez que ésta se halla en el aire, puede apoyarse en vientos más fuertes a mayor altura. No debe echarse a volar nunca una cometa cerca de, o sobre, una carretera, ya que su vuelo puede distraer la atención de los automovilistas. Está prohibido jugar con ellas en las proximidades de los aeropuertos. Tampoco debe hacerse volar una cometa utilizando hilo conductor como cuerda de amarre, e incluso cuando use una cuerda nunca eche la cometa cerca de un tendido eléctrico ni cuando haya tormenta. Contrariamente a lo que mucha gente cree, Benjamin Franklin no llevó a cabo su famoso experimento durante una tormenta, sino cuando ésta se estaba aproximando. Incluso así, tuvo suerte de no morir electrocutado. En cualquier caso, aun cuando el viento sea una brisa suave, deben utilizarse guantes gruesos de los empleados para trabajar, así se podrá agarrar la cuerda sin riesgo de que ésta queme las manos. Por último, hay que tener cuidado con los árboles "tragacometas", ya que pueden estropear en un minuto el trabajo de horas.

Para lanzar una cometa se debe mantener ésta con más o menos 20 grados de inclinación respecto a la vertical, en una posición aparentemente correcta de vuelo, dejándola suelta cuando pase una ráfaga de aire y dándole cuerda lentamente desliando el carrete. Se debe mantener tensa la cuerda, para que continúe el ascenso. Si la brisa es suave, se puede pedir ayuda a un amigo, el cual sujetará la cometa a unos 50 metros de la persona que tiene el carrete, manteniendo tensa la cuerda de amarre. Cuando pase una ráfaga de viento, el primero suelta la cometa lanzándola hacia arriba y el segundo va dando tirones ascendentes de la cuerda de amarre con una y otra mano. De esta forma, tirando y llevando la cometa en dirección contraria a la brisa, se consigue la elevación de la misma.

Si la cometa se agita y no sube, puede ser porque la brida está muy alta: habrá que bajarla. Si la cometa se mueve sin ton ni son y describe curvas continua-

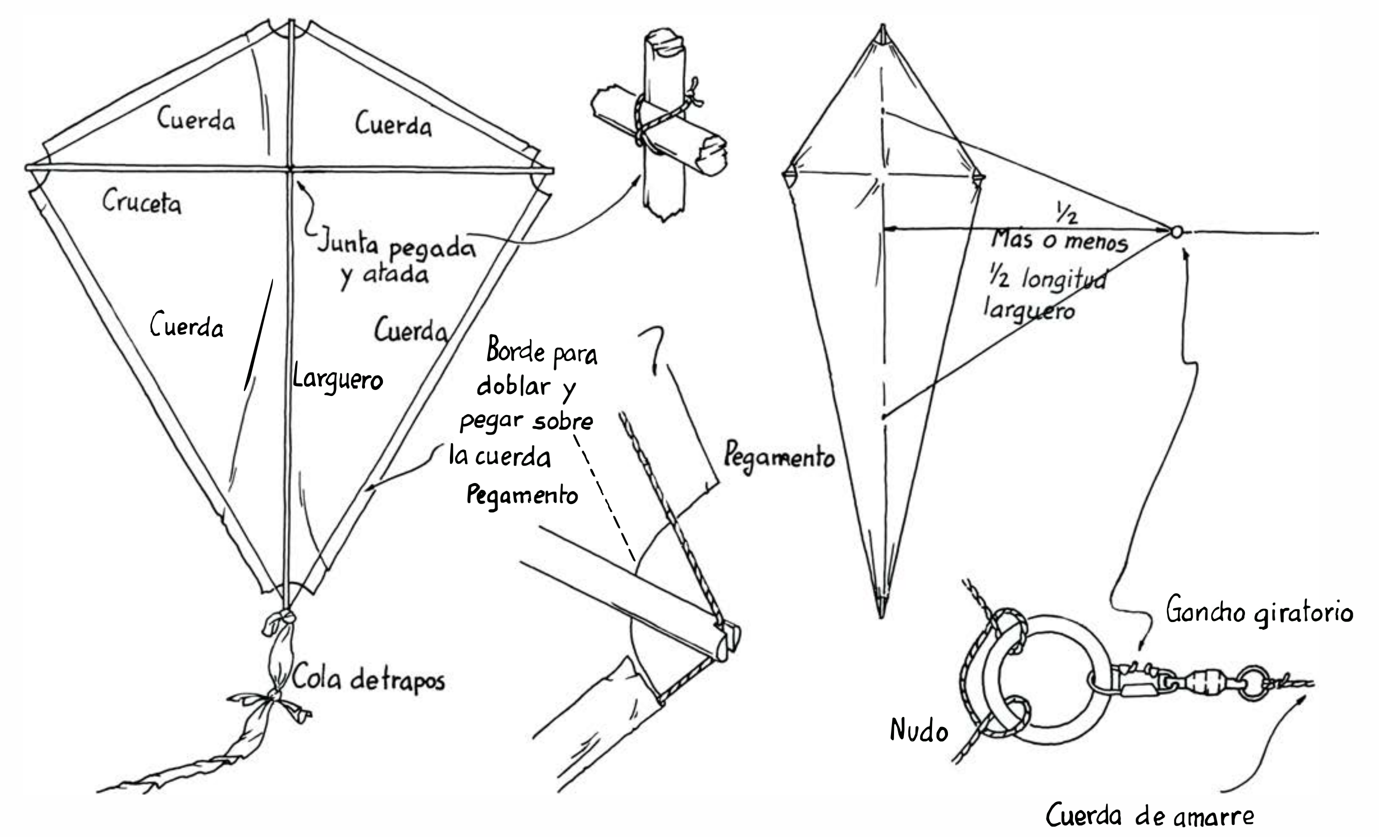
mente puede ser porque esté demasiado baja y habrá que subirla. Cuando una cometa lisa o arqueada sube hasta muy arriba, ya no presenta ninguna sección opuesta al viento y, por tanto, pierde altura. A medida que va cayendo (parcialmente vocada) presenta un ángulo de ataque negativo, pero puede autocorregirse después de que ha descendido lo suficiente. Si la cometa está alta, puede resultar divertido ver cómo cae describiendo curvas. Si está baja, puede estrellarse contra el suelo al final de la curva.

Para hacer descender a la cometa, el lector probablemente enrollaría la cuerda de amarre en el carrete, pero cuando la brisa es algo fuerte esta labor puede hacerse muy difícil o imposible. Otra alternativa podría ser darse un paseo a lo largo de la cuerda de la siguiente forma: ate el extremo de la cuerda a un objeto fijo o déselo a un amigo para que lo sujete. Después, hay que moverse en dirección a la cometa tirando de la cuerda hacia abajo con ambas manos. Una vez que la cometa ha descendido hasta las zonas de brisa más ligera próxima al suelo, el rebobinado es más fácil.

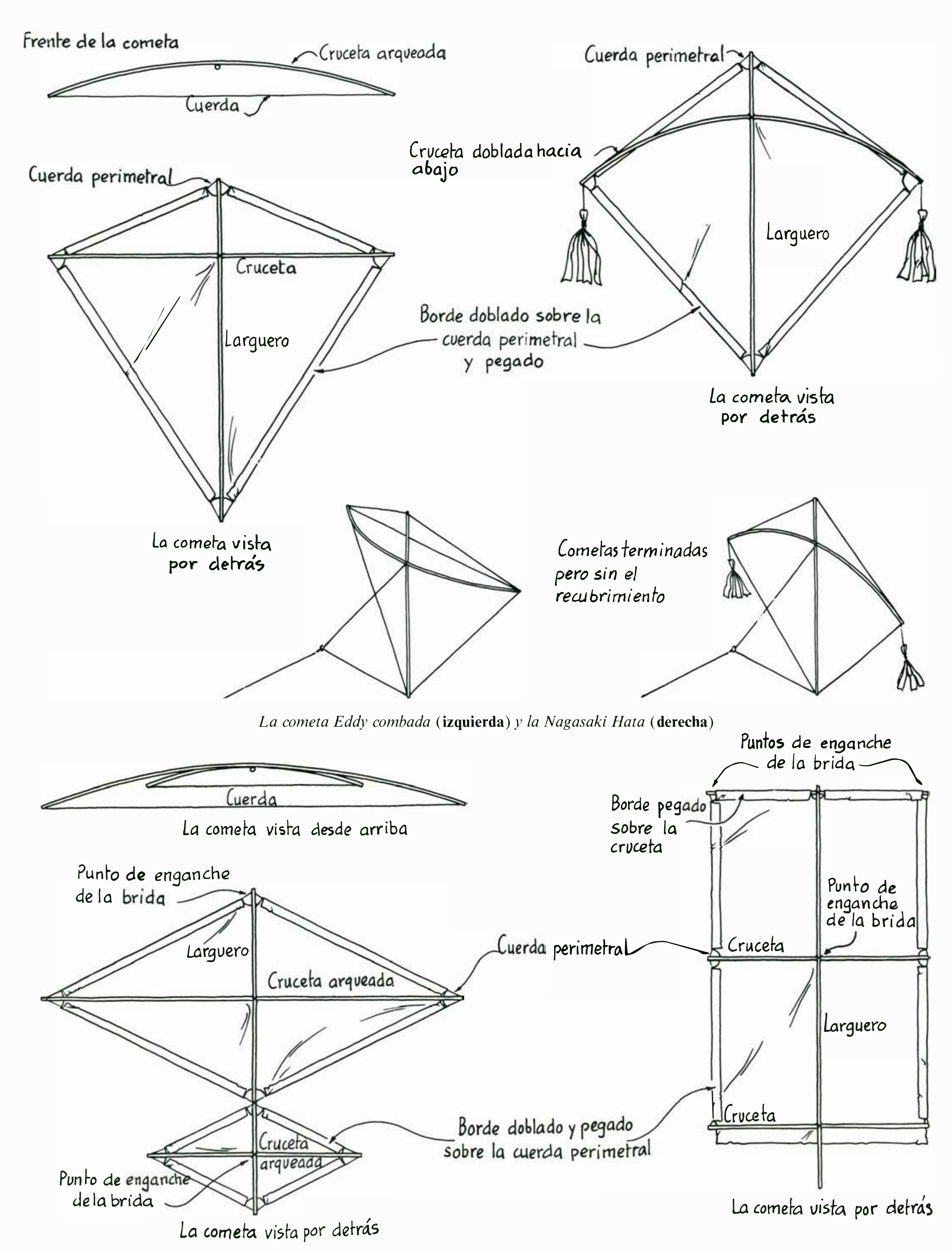


Vista del ángulo diedro desde arriba

Para construir una cometa se debe decidir primero qué materiales se van a usar para las dos partes básicas de la misma: el armazón y la cubierta. En Oriente, el armazón se ha venido haciendo tradicionalmente con caña de bambú abierta por la mitad. Las cañas resultan ligeras y fuertes y pueden doblarse sin demasiado trabajo. En Occidente suelen emplearse ramas de pino. Actualmente se pueden usar tubos de fibra de vidrio o de aluminio, que son más fuertes, si bien cuesta manejarlos y, además, resultan caros (para cortar la fibra de vidrio puede ser necesaria una mascarilla, ya que es peligroso respirar el aire que pueda contener partículas de este producto). Los tubos de fibra de vidrio y de aluminio deben conectarse entre sí con algún tipo de tubería de plástico, ligeramente más ancha. Por todo esto, y a no ser que el lector sea ya un experto constructor de cometas, yo le aconsejaría que trabajara con palos de madera de unas medidas aproximadas de 14 a 19 cm de largo por 5-6 mm de diámetro. Las tiras rectangulares que van colocadas en forma de cruz con el eje principal deberán tener



Pasos a seguir para hacer una cometa básica en forma de rombo



La cometa Eddy combada (**izquierda**) *y la Nagasaki Hata* (**derecha**)

La cometa de doble rombo (**izquierda**) *y la Musha* (**derecha**)

unas dimensiones aproximadas de 3-9 milímetros. El mejor tipo de madera parece ser el abeto, aunque también sirven otros tipos de árboles. Estos palos se pueden comprar baratos en çualquier carpintería o almacén de maderas. Antes de comprarlos debe comprobarse que están bien derechos y sin nudos.

El material tradicional para cubrir las cometas ha sido bien tela o papel fuerte de poco peso. La tela es fuerte y duradera, pero hay que coserla. Por su parte, el papel se rasga con mayor facilidad, pero tiene la ventaja de que se puede pegar al armazón de la cometa. Recientemente se ha hecho popular el plástico Mylar, que es fuerte, relativamente barato, ligero y puede fijarse con cinta adhesiva. El plástico Mylar se puede adquirir en tiendas de cometas y en algunas ferreterías. Otros materiales modernos son el Zephyrlite y el Stabilkote, que pueden ser fijados o bien cosiéndolos o pegándolos con cinta adhesiva. Ambos son ligeros, fuertes y con buena resistencia al desgarramiento.

Personalmente creo que el mejor material que se puede usar es Tyvek, una fibra sintética de la firma Du Pont. Puede parecer tela o papel, dependiendo del tipo que se compre, pero de cualquier manera es casi imposible romperlo con la mano. Tiene todas las ventajas del papel, es bastante barato, se puede fijar al armazón con pegamento en pocos minutos, se puede pintar con pintura corriente o con rotulador, pero el hecho de que no se desgarre con facilidad le hace superior al papel. También pueden usarse otros materiales de recubrimiento tales como lona de vela (a veces se pueden adquirir restos de algún fabricante local de barcos), nylon no desgarrable, etcétera. Hay algunos materiales de uso doméstico que también son apropiados: papel de envolver, bolsas de papel marrón y bolsas de plástico del tipo de las que se usan para la basura.

La cuerda de amarre de la cometa puede ser la corriente de algodón, pero la de nylon es más ligera y resistente. Una limitación a la altura máxima que puede alcanzar una cometa es el peso de la cuerda de amarre que debe soportar; por tanto, es más conveniente ponerle una cuerda que tenga una alta relación resistencia-peso. El punto de rotura de la cuerda de amarre debe ser lo suficientemente elevado como para evitar que se pierda la cometa al primer intento de vuelo. Wyatt Brummitt, en "Kite Lines", da una regla sobre la fuerza que debe ser capaz de soportar: el punto de rotura (expresado en libras de peso) debe ser equivalente a, por lo menos, tres veces el total del área frontal de la cometa (expresado en pies cuadrados: 1 pie es igual a 0,304 metros). El carrete en el que se enrolla la cuerda de amarre puede ser simplemente un trozo de caña, que es lo que yo uso, o cualquier carrete convencional de los útiles de pesca. Algunos aficionados a las cometas las hacen volar saliendo el hilo de una caña de pescar, lo cual ofrece una imagen curiosa a los transeúntes.

Existen otros materiales que pueden hacer más fácil la construcción de una cometa. Si se emplean bastones, éstos pueden pegarse después de que han sido colocados y atados con cuerdas. Normalmente se ha venido usando pegamento blanco para fijarlos, pero recientemente los aficionados a las cometas prefieren comprar pistolas de cola caliente. El pegamento blanco puede tardar hasta una hora en secarse, mientras que la cola de la pistola necesita sólo dos minutos. Las pistolas hacen la construcción más fácil y facilitan también el trabajo de reparación en los armazones rotos. Si el lector quiere usar una pistola de cola, le recomendaría que tuviera al lado un recipiente con agua porque puede caerle cola caliente en la piel, y la única manera de evitar una quemadura seria es sumergir rápidamente la zona afectada en agua. Otros dos instrumentos de trabajo convenientes son: una hoja de sierra de las que se usan para cortar madera, un punzón y ojetes metálicos para hacer agujeros en los materiales y protegerlos con los ojetes.

La brida puede acabar en una pequeña lazada a la cual se ata la cuerda de amarre de la cometa, pero si ésta gira con viento moderado, el freno se torcerá. Para evitar este problema, se puede ajustar la brida a un pequeño anillo de metal o de plástico con un nudo y después añadirle un enganche del tipo de los que se usan para las cañas de pescar, entre el anillo y la cuerda de amarre de la cometa. Este enganche se puede comprar en una tienda de deportes.

Ahora, construyamos una o dos cometas. Describiré aquí algunos diseños básicos de las mismas. Existen otros muchos que sería muy interesante construir debido a su distinta aerodinámica. Quizá me ocupe de alguno de los otros diseños en un futuro artículo para esta misma sección.

Todas las ilustraciones de los diseños de los que hablaré están trazadas a la misma escala en pulgadas (una pulgada equivale a 25,4 mm); ésta aparece en el lado izquierdo de la ilustración inferior

de la página 111. Para medir la longitud de cualquier palo o el lado de una cometa, sólo hay que marcar la longitud que tiene en la ilustración en una hoja de papel, y colocar después el borde del mismo sobre la escala. Si el lector deseara hacer una cometa mayor o menor que la del plano, deberá medir primero las dimensiones de mi cometa y después incrementarlas o reducirlas proporcionalmente. Tenga presente, si desea hacer una cometa grande, que ésta tendrá que salir por la puerta de su casa.

El primer diseño es una cometa en forma de rombo, con una cruceta (palo horizontal) perpendicular a un larguero (palo vertical) y que se cruzan a una distancia de aproximadamente un cuarto de la medida del larguero. Los palos se cortarán a la medida adecuada con una sierra, dejando los bordes suaves; después se marcarán los puntos de intersección para el cruce de los dos palos; teniendo cuidado de que el punto esté exactamente en la mitad de la cruceta. Los dos palos pueden unirse por medio de un toque de cola caliente con la pistola. Después de unos minutos se pueden atar con un hilo fuerte (como el de pescar, por ejemplo), y se puede aplicar más cola si se desea. La unión de estos palos se puede hacer aplicando primero la cola y recubriendo luego la junta con una capa de papel adhesivo o al contrario, para conseguir una mayor fijeza. Se debe tener mucho cuidado de que los palos se hallen exactamente perpendiculares el uno respecto del otro.

Antes de montar los palos, se deben hacer unas pequeñas entalladuras en los extremos con una hoja de sierra. En uno de los extremos se atará la punta de una cuerda y se pasará ésta a lo largo de la muesca, y después se va haciendo lo mismo en las otras muescas hasta que la cuerda describa el rombo básico de la cometa. Compruebe por medio de una inspección visual el equilibrio de la cometa. También puede hacerlo haciendo pasar una aguja a través de la junta de la cruceta y el larguero, y viendo si el marco de la cometa cuelga recto de la aguja. Si está claramente desequilibrado, habrá que ajustar los palos y la cuerda.

Coloque el armazón sobre el material que piense usar para cubrir la cometa. Corte éste con la forma del armazón, dejando un poco más en los bordes para doblarlo sobre las líneas exteriores y unirlo por dentro del rombo. Si el material es papel o Tyvek, este borde se puede unir con pegamento, si es tela habrá que coserlo y, si es Mylar, pegarlo con cinta adhesiva. Póngale una brida de dos patas al larguero. Haga una cola de tela de seis pulgadas de longitud atada a una pieza estrecha de tela, la cual será unas 5 veces más larga que el larguero.

La cometa de Eddy se hace más o menos de la misma forma, con la excepción de que no necesita cola y que la cruceta se dobla hacia atrás después de haber puesto la cubierta en el armazón. Para ello, coloque una punta de la cruceta en el suelo y dóblelo de manera que la cubierta esté en el exterior de la curva. Ponga una cuerda desde un extremo al otro del larguero para mantenerlo doblado. Las cuerdas de la brida se pasan a través de pequeños agujeros abiertos en la cubierta y se unen al larguero por los puntos indicados en la ilustración de la página 112, arriba a la izquierda. La forma cóncava proporciona el ángulo diedro necesario para la estabilidad de la cometa. Esta cometa funciona bien con vientos ligeros y moderados.

El siguiente paso para hacer un tercer tipo de cometa, la Nagasaki Hata, consiste en poner la cruceta y el larguero formando cuatro ángulos rectos después de asegurarse de que están equilibrados. Se ata bien el punto de unión, se dobla la cruceta hacia abajo y, manteniéndolo así, se fija la cubierta. Esta se une al larguero y se añade una borla a cada extremo de la cruceta. Las borlas pueden ser de cintas, del tipo de las que se usan para los paquetes de Navidad. Asegúrese de que la cometa está equilibrada, ajustando bien las borlas. Si éstas se hallan bien puestas, ayudan a estabilizar la cometa de la misma forma que lo hace una cola. La cruceta doblada es empujada hacia atrás por el viento, produciendo una cara curvada similar a la de la cometa de Eddy, sólo que, con este diseño, la medida de la curva está obviamente determinada por la fuerza del viento.

El cuarto tipo de cometa, la de doble rombo, es parecida a la de Eddy, con excepción de que se inserta un rombo más pequeño debajo del principal. Los dos rombos se construyen con el mismo larguero y se doblan hacia atrás. El rombo pequeño actúa de timón para estabilizar la cometa, la cual puede volar con vientos ligeros y moderados.

Muchas de las cometas orientales son rectangulares. La Musha es fácil de construir y tiene una característica aerodinámica muy interesante: el borde rastrero (en la cruceta inferior), el cual ayuda a estabilizar la cometa de forma muy parecida a como lo hace la cola. Esta cometa puede volar con vientos ligeros y suaves.

Libros

Un atlas histórico para adolescentes y una colección introductoria a la economía actual

Carlos Martínez Shaw y Antoni Montserrat

ATLAS HISTORICO INTEGRAL SPES, Bibliograf; Barcelona, 1977; 160 páginas. Prólogo de Ricardo de la Cierva. Los modernos métodos educativos exigen, de manera cada vez más apremiante, la puesta a punto de instrumentos didácticos que ayuden a maestros y estudiantes en sus respectivas tareas, que contribuyan a hacer más fácil y eficaz el aprendizaje en las distintas áreas científicas. Para la enseñanza de la historia, una de las herramientas más requeridas por sus indudables servicios es el atlas histórico. Por ello hay que saludar la aparición de publicaciones de este tipo realizadas, como en el caso que nos ocupa, con innegable competencia, tanto por su orientación pedagógica general, como por su adecuada utilización de modernas técnicas de diseño gráfico.

El Atlas Histórico Integral Spes es una compleja obra didáctica, que incluye, junto a un extenso material cartográfico, toda una serie de elementos complementarios, como son cuadros cronológicos y genealógicos, gráficos sobre hechos culturales sociales y políticos, y un breve diccionario, discretamente ilustrado, de conceptos históricos y artísticos.

Si analizamos la parte cartográfica, núcleo central del libro, nos encontramos con una colección de un centenar de mapas ordenados cronológica y temáticamente, que abarcan desde los primeros yacimientos prehistóricos hasta la actual configuración económica, política e institucional del mundo. Entre las cartas se incluyen cuadros y gráficos sobre temas diversos de interés histórico, desde la organización de la democracia ateniense hasta la trayectoria política de la España decimonónica. Asimismo, se ofrece a continuación una sección de textos explicativos de cada uno de los mapas, que contribuyen, sin duda, a una mejor lectura del lenguaje formalizado de la cartografía.

Técnicamente, las cartas cuentan entre sus méritos con una acertada utilización de las diferentes tintas con valor explicativo, con el empleo de distintos trazos para señalar la certeza o incertidumbre históricas de los datos y con la proliferación de signos indicativos, que permite multiplicar las informaciones sobre el período o el área geográfica en cuestión con notable ahorro de espacio y con la ventaja de la simultaneidad. A veces, sin embargo, esta última cualidad no representa un valor absoluto: el deseo de síntesis lleva a una excesiva acumulación de signos que dificultan la lectura inmediata y obscurece la información, sobre todo cuando este hecho se combina con una reducción exagerada de las dimensiones de la carta, como ocurre en algunos casos.

Conceptualmente, el Atlas representa un notable esfuerzo por superar las barreras historiográficas tradicionales, que en tantas ocasiones han contaminado este género de obras, ofreciendo, junto a los hechos diplomáticos y políticos, panorámicas más amplias que abren sobre fenómenos demográficos, económicos o culturales: así, junto a los clásicos, y obligados, mapas que reflejan las fronteras fijadas por los tratados de paz, nos encontramos con otros que nos informan sobre la expansión del protestantismo o la economía peninsular en tiempos de los Reyes Católicos. Este afán por rebasar el mero marco de la historia externa, que es una de las más estimables características de la obra, y la pulcritud general del conjunto, no nos oculta, sin embargo, algunos planteamientos deficitarios.

Como ejemplo, habría que destacar la extremada ambigüedad del mapa n.º 100 sobre la economía mundial en la actualidad. El rígido empleo de la divisoria de los 500 dólares de renta per cápita establece una dicotomía artificial entre países capitalistas y países del Tercer Mundo (conceptos que, por otra parte, hacen referencia a realidades distintas: sistema económico y nivel de desarrollo), provocando el contrasentido de colocar a Egipto y Siria en el Tercer Mundo y a Jordania e Irak entre los capitalistas, o a Mauritania y el Senegal entre los primeros y a Marruecos y Costa de Marfil entre los segundos. Al mismo tiempo, otra terminología imprecisa sitúa a Birmania entre los países socialistas junto a China o Checoslovaquia y a Libia entre las naciones industrializadas en el mismo plano que Gran Bretaña: criterios todos ellos ilusorios que enmascaran más que esclarecen la realidad estudiada.

Del mismo modo, los gráficos complementarios destacan por su diseño (presentación de la información en diferentes tipos de gráficos, inclusión de los mismos ya como complemento a la cartografía, ya en una sección separada), así como por su deseo de alcanzar una visión más amplia (adelantos técnicos, acontecimientos científicos, evolución artística, historia del deporte, etcétera). También, sin embargo, en este capítulo, se pueden señalar algunos reparos. El primero, el más general, emana quizá del propio carácter de la obra: la necesaria limitación de espacio exige una selección temática, que en algunas ocasiones nos parece desacertada, o al menos descompensada.

Tal vez este defecto reseñado sea difícilmente salvable, tal vez no haya un criterio intachable, pero no nos parece adecuada la elección de temas como la evolución de 65 literaturas desde sus orígenes a nuestros días, en un cuadro que en aras de la exhaustividad sacrifica la inmediatez de la exposición gráfica. De mayor consideración se nos aparecen las deficiencias en la confección de ciertos cuadros. Así resulta cuando menos discutible la elaboración de cuadros como el de la historia del progreso científico, que se reduce a una prolija enumeración de invenciones o hallazgos de desigual valor, y en el que, por poner un ejemplo, Galileo sólo aparece citado por su descubrimiento de los satélites de Júpiter, mientras se omite junto al nombre de Copérnico la mención a la teoría heliocéntrica. También es sumamente opaco el gráfico sobre la evolución de las sociedades, que se agrupan en cuatro tipos que son otros tantos estadios de progreso humano (sociedades primitivas, agrourbanas, comerciantes e in-

dustriales) designados con términos excesivamente generales y de escaso valor explicativo. Algunos errores (como, por citar un ejemplo, el del presunto golpe de estado del Cardenal Infante en tiempos de Carlos II) deben obligar a una revisión de la obra de cara a una posible reimpresión.

Finalmente, el bien elaborado diccionario de conceptos históricos y artísticos que cierra la obra resulta de gran valor a la hora de formarse una idea clara de algunos de los términos más usuales y, por ello, más necesitados de una definición precisa.

Como hemos dicho, los atlas históricos son un complemento imprescindible de los libros de texto para alcanzar un conocimiento riguroso de la evolución de la humanidad. Por ello, la obra que consideramos es, en líneas generales, un útil instrumento para el aprendizaje de la historia, en cuya elaboración se han puesto a contribución las modernas técnicas visuales y algunos elementos de la nueva concepción científica de aquella disciplina. Sin duda puede prestar buenos servicios a estudiantes de segunda etapa de Enseñanza General Básica o de Bachillerato Unificado Polivante (etapas correspondientes al liceo de otros países), a quienes va especialmente dirigida. El libro viene precedido de un prólogo de Ricardo de la Cierva, que se limita a presentarlo y a resaltar algunas de sus cualidades más destacadas (C.M.S.).

CICLOS ECONOMICOS: TEORIA Y EVIDENCIA, por Nicholas Rau. ECONOMIA DEL DESEQUILIBRIO, por Jost van Doorn. EL CONCEPTO DE OPCION SOCIAL, por David J. Mayston. Editados por Vicens Vives, Barcelona, 1976. Los dos primeros libritos, de la colección Macmillan - Vicens Vives, representan una buena introducción a la economía de la inestabilidad y de las oscilaciones, tan importante a la hora de interpretar, o al menos de comprender, la nueva situación creada con el desencanto imperial en Vietnam y la crisis ecológica y energética. Ambos manuales de bolsillo utilizan, además, un mismo aparato matemático, relativamente simple, el de las ecuaciones en diferencias finitas de segundo orden. En el maravilloso mundo de la expansión de postguerra el análisis dinámico no ha sido excesivamente habitual. Y aún hoy no es fácil encontrar un tratamiento económico del tiempo en la literatura más usual. Los estudios del ciclo han venido practicándose sobre todo como esfuerzo estadístico y de historia económica.

Rau resume, en primer lugar, lo poco que sabemos sobre la naturaleza de los ciclos y sobre su historia: son oscilaciones de la economía que afectan simultáneamente, aunque no de manera totalmente uniforme, a diferentes sectores, bien en forma de expansión, bien en forma de contracción, de modo repetitivo, recurrente, pero sin periodicidad predeterminada y con abundancia de factores no explicados que nos aparecen como aleatorios. También sabemos que los ciclos son un fenómeno aparecido con la economía capitalista y que las crisis de subsistencia de otras épocas históricas corresponden seguramente a mecanismos diferentes. También sabemos que las expansiones suelen en principio ser más largas que las recesiones, porque la riqueza económica históricamente ha ido creciendo, en última instancia.

La evidencia empírica que nos viene proporcionada por los exhaustivos estudios del National Bureau of Economic Research aporta otros criterios generales, como que los tipos de interés suelen aumentar en las expansiones y que las variaciones en la inversión en equipos y existencias suelen preceder a las variaciones generales del producto agregado. También hemos dado nombre a determinadas oscilaciones observadas empíricamente: los ciclos de onda larga de Kondratieff, de 55 años (poco claros), los Kuznets o de la construcción de 16 a 20 años, que parecen haber desaparecido en Estados Unidos, los ciclos Juglar, propuestos por Schumpeter, y avalados por Alvin Hansen, de 8 a 10 años, Rostow también coincide con esa longitud.

Rau desarrolla a continuación el modelo multiplicador-acelerador construido a partir de los criterios keynesianos sobre el multiplicador del consumo y el acelerador de la inversión, y a partir de él discute el modelo de Hicks de techos y suelos, límites máximo y mínimo de la renta y de la inversión respectivamente, lo que no le parece suficientemente explicativo. El modelo de Hicks introduce la política fiscal keynesiana. Puede establecerse un modelo paralelo, pero teniendo en cuenta la política monetaria. Los tratamientos econométricos o analíticos, es decir, inductivos, a partir del modelo Klein-Goldberger, por ejemplo, tienden a dar gran importancia a los impulsos no explicados o aleatorios. Así tienden a suponer que es más realista intepretar la situación de las economías capitalistas como un sistema estable sometido a impulsos aleatorios que como un sistema altamente inestable con o sin impulsos aleatorios. Claro que estos impulsos no explicados no sabemos si se deben más a las inconsistencias y frivolidades de los políticos que a la debili-

dad interpretativa y a la miseria teórica de los economistas, o a ambas cosas a la vez. Una técnica econométrica posterior a la tradicional de Klein Goldberger es la del análisis espectral, aplicado por Chow y Howrey.

Gran importancia ha adquirido ultimamente, después del fracaso práctico del keynesianismo y a raíz del revival neoclásico, el estudio del comportamiento de la velocidad del dinero. Pero Rau juzga indemostrada la hipótesis de Friedman sobre la dependencia fundamental de la renta con respecto a la política monetaria y la correspondiente irrelevancia de la fiscalidad, el consumo agregado y la inversión. Al contrario, Rau razona sobre la experiencia histórica para dudar de la plausibilidad de los supuestos friedmanianos, a los que considera vinculados a una investigación mal orientada.

Finalmente Rau se pregunta si los ciclos se han acabado. Se contesta que seguramente las depresiones como la de 1929, sí, pero que en cambio las oscilaciones son un fenómeno evidente que no sabemos todavía evitar. Así el fracaso de las políticas estabilizadoras aparece en el caso inglés simplemente corrigiendo los ciclos actuales de la renta con la tendencia de fondo: las oscilaciones anteriores a 1914 se nos presentan con la misma intensidad que las actuales. Aunque quizá hayamos logrado amortiguar las fluctuaciones del empleo.

El librito de Van Doorn, que, como hemos dicho, utiliza el mismo instrumental matemático que el de Rau, se inicia igualmente con una consideración de los retardos y luego sigue con una discusión del ciclo de inventarios de Metzler para discutir después en el contexto individual o microeconómico el teorema de la telaraña en sus distintas variantes, entre ellas el ciclo maíz-cerdos y la telaraña con aprendizaje de Goodwin. Como sabemos, los casos más simples de telaraña parten del supuesto de que toda la producción de un determinado bien se ofrece para la venta en el mercado en momentos precisos, discretos; y los precios responden automáticamente a las situaciones de desequilibrio. Goodwin parte del supuesto de que hay una adquisición de experiencia, en la vía de un tanteo sucesivo, en un supuesto bastante más realista.

En la parte macroeconómica central se discute paralelamente en el libro de Rau temas como el multiplicador-acelerador, el ciclo de inventarios y el modelo neoclásico de ajustes entre oferta y demanda, basado en una flexibilidad total de los ajustes de precios y rentas. Finalmente se hace una consideración sobre

el modelo teórico keynesiano. Comenta las políticas de estabilización tanto desde una perspectiva microeconómica como en el ámbito macroeconómico, llegando a la conclusión de que quizás, visto el fracaso de las políticas de estabilización, en realidad no se haya pretendido nunca implementar auténticas políticas estabilizadoras, que las palabras no correspondan a los hechos y que la intención haya sido otra.

La teoría de la elección u opción social, "choice" en inglés, se ha desarrollado como una rama de la teoría del bienestar a partir de las aportaciones de Arrow y su teorema de las imposibilidades, formulación moderna y en el campo de las ciencias sociales de la famosa paradoja de Condorcet (1785). Esta paradoja se refiere a que, en determinadas condiciones, las relaciones entre varios sujetos y varios objetos impiden que la elección sea uniunívoca, dándose una indefinición sobre las escalas de preferencias ante la perplejidad de los sujetos. El tema, en el campo lógico ha sido objeto de atención por autores como el reverendo C.L. Dodgson, el famoso Lewis Carroll del mundo literario. Mayston precisamente está trabajando en la línea de establecer *la posibilidad de la elección social.* El librito, por tanto, parte de un análisis lógico de las propiedades fundamentales que intervienen en la discusión: reflexividad, orden completo y transitividad; y luego introduce, generalizándolo, los criterios de comportamiento del consumidor heredado de Pareto y su escuela: la tasa marginal de equivalencia y las correspondientes curvas de indiferencia y las bases para que pueda hablarse de comparaciones de utilidad marginal.

Mayston luego pasa de la elección individual a la opción social, partiendo de criterios de decisión por mayoría. Entonces aparecen las intransitividades, es decir, la elección resulta dependiente del camino seguido. De la existencia o no de estas intransitividades se deduce el que pueda hallarse o no una función de bienestar social de Arrow. Se discute también la función de bienestar social de Bergson y el excedente del consumidor.

Mayston vuelve al marco más general de Pareto, pero sin perder nunca el hilo de la referencia a las condiciones de Arrow, especialmente la condición de independencia. Por fin, señala alguna de las condiciones para el funcionamiento de una elección por mayoría. De bastante interés es su discusión de la lucha por el centro en un sistema bipartidista y el tema del marco constitucional, todo ello siempre en el contexto de los modelos de opción social (A.M.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

YACIMIENTOS METALICOS EN LA LITOSFERA OCEANICA

METALLOGENESIS AT OCEANIC SPREADING CENTERS. Enrico Bonatti en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* vol. 3, págs. 401-431; 1975.

COOPER-IRON SULFIDE MINERALIZATIONS FROM THE EQUATORIAL MID-ATLANTIC RIDGE. Enrico Bonatti, Beatriz-Melba Guerstein-Honnorez y José Honnorez en *Economic Geology,* vol. 71, págs. 1515-1525; 1976.

METABOLISMO INTERMEDIARIO DURANTE EL EMBARAZO

THE PHYSIOLOGY OF HUMAN PREGNANCY. F. E. Hytten e I. Leitch. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 1971.

EARLY DIABETES IN EARLY LIFE. R. Camerini-Davalos y S. Cole. Academic Press. New York, 1975.

METABOLISMO DE LOS GLICERIDOS EN EL TEJIDO ADIPOSO. E. Herrera en *Investigación y Ciencia,* págs. 28-37; enero, 1977.

ENSAMBLAJE CONTROLADO POR ORDENADOR

ECONOMIC-TECHNOLOGICAL MODELING AND DESIGN CRITERIA FOR PROGRAMMABLE ASSEMBLY MACHINES: CSDL REPORT No. T-625. P. M. Lynch. Charles Stark Draper Laboratory, 1976.

A MULTIDIMENSIONAL SYSTEM ANALYSIS OF THE ASSEMBLY PROCESS AS PERFORMED BY A MANIPULATOR: CSDL REPORT NO. P-364. Paul C. Watson. Charles Stark Draper Laboratory, 1976.

MICROCIRCUITOS DEL SISTEMA NERVIOSO

ORGANIZATION OF THE PRIMATE RETINA: ELECTRON MICROSCOPY. John E. Dowling y Brian B. Boycott en *Proceedings of the Royal Society,* Serie B. vol. 166, págs. 80-111; 1966.

SYNAPTIC ORGANIZATION OF THE BRAIN. Gordon M. Shepherd. Oxford University Press, 1974.

LOCAL CIRCUIT NEURONS. Dirigido por Pasko Rakic en *Bulletin of the Neurosciences Research Program,* vol. 13, n.º 3, págs. 291-446; 1975.

ELECTRONIC PROCESSING OF INFORMATION BY BRAIN CELLS. Francis O. Schmitt, Parvati Dev y Barry H. Smith en *Science,* vol. 193, n.º 4248, págs. 114-120; 9 de julio de 1976.

PLANTAS CARNIVORAS

ENZYME RELEASE IN CARNIVOROUS PLANTS. Yolande Heslop-Harrison en *Lysosomes in Biology and Pathology: Vol. IV,* dirigido por J. T. Dingle y R. T. Dean. A.S.P. Biological and Medical Press, 1975.

THE CARNIVOROUS PLANTS. Francis Ernest Lloyd. Dover Publications, Inc., 1976.

COMPARATIVE SENSORY PHYSIOLOGY OF THE DROSERACEAE–THE EVOLUTION OF A PLANT SENSORY SYSTEM. Stephen E. Williams en *Proceedings of the American Philosophical Society,* vol. 120, n.º 3, págs. 187-204; 15 de junio de 1976.

LA GENETICA DEL CANCER HUMANO

SOMATIC CELL HYBRIDS BETWEEN MOUSE PERITONEAL MACROPHAGES AND SV40-TRANSFORMED HUMAN CELLS, I: POSITIVE CONTROL OF THE TRANSFORMED PHENOTYPE BY THE HUMAN CHROMOSOME 7 CARRYING THE SV40 GENOME. Carlo M. Croce e Hilary Koprowski en *The Journal of Experimental Medicine,* vol. 140, n.º 5, págs. 1221-1229; 1 de noviembre de 1974.

CLUSTERING OF ABERRATIONS TO SPECIFIC CHROMOSOMES IN HUMAN NEOPLASMS, II: A SURVEY OF 287 NEOPLASMS. Felix Mitelman y Göran Levan en *Hereditas,* vol. 82, n.º 2, págs. 167-174; 1976.

LOSS OF MOUSE CHROMOSOMES IN SOMATIC CELL HYBRIDS BETWEEN HT-1080 HUMAN FIBROSARCOMA CELLS AND MOUSE PERITONEAL MACROPHAGES. Carlo M. Croce en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 73, n.º 9, págs. 3248-3252; septiembre, 1976.

NEOPLASTIC TRANSFORMATION–MECHANISMS AND CONSEQUENCES: REPORT OF THE DAHLEM WORKSHOP ON NEOPLASTIC TRANSFORMATION, 1977. Dirigido por Hilary Koprowski. Berlín, 1977.

SUPERGRAVEDAD Y LA UNIFICACION DE LAS LEYES DE LA FISICA

PROGRESS TOWARD A THEORY OF SUPERGRAVITY. Daniel Z. Freedman, Peter van Nieuwenhuizen y Sergio Ferrara en *Physical Review D: Particles and Fields,* vol. 13, n.º 12, págs. 3214-3218; 15 de junio de 1976.

ONE-LOOP RENORMALIZABILITY OF PURE SUPERGRAVITY AND OF MAXWELL-EINSTEIN THEORY IN EXTENDED SUPERGRAVITY. Marcus T. Grisaru, Peter van Nieuwenhuizen y J. A. M. Vermaseren en *Physical Review Letters,* vol. 37, n.º 25, págs. 1662-1666; 20 de diciembre de 1976.

SISTEMAS DE REFRIGERACION PASIVA EN LA ARQUITECTURA IRANI

AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION. William H. Severns y Julian R. Fellows. John Wiley & Sons, Inc., 1958.

PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER. Frank Kreith. International Textbook Co., 1965.

JUEGOS MATEMATICOS

THE KRUSKAL PRINCIPLE. Martin Gardner y Karl Fulves en *The Pallbearers Review,* págs. 967, 970; junio, 1975.

A PROBLEM IN CHECKER-JUMPING. Ross Honsberger en *Mathematical Gems II.* The Mathematical Association of America, 1976.

APPROACHES AND USES OF THE "KRUSKAL KOUNT". Ed Marlo y Charles M. Hudson en *The Linking Ring,* vol. 56, n.º 12, págs. 82-87; diciembre, 1976.

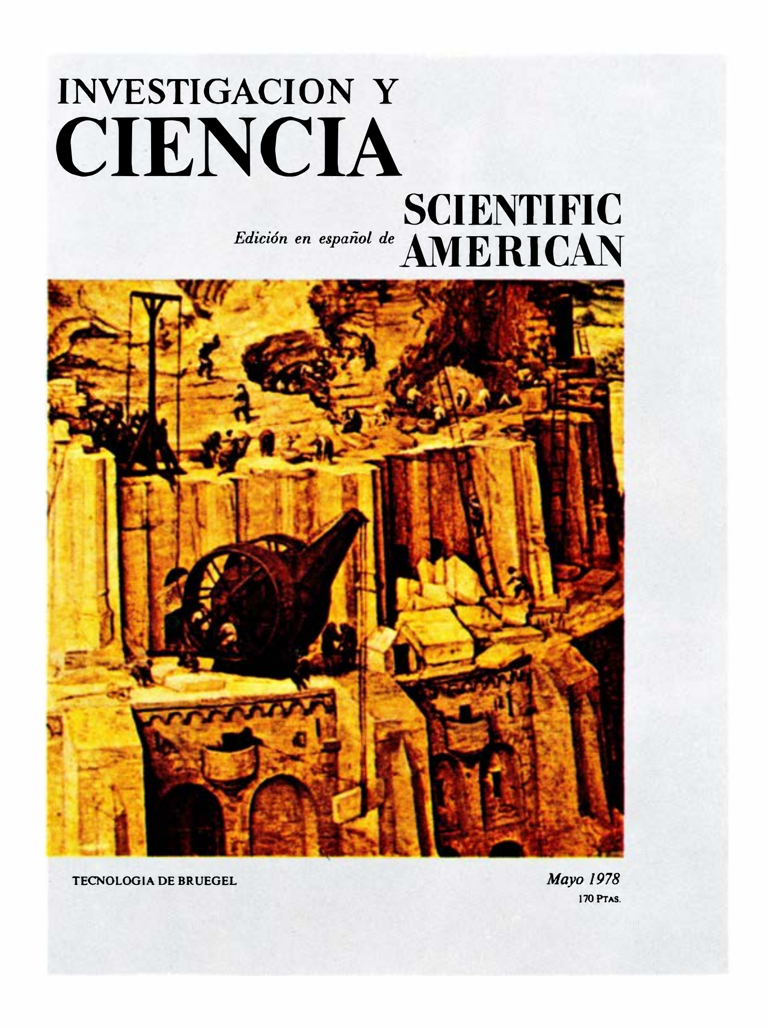
TALLER Y LABORATORIO

KITES. Wyatt Brummitt. Golden Press, 1971.

KITE CRAFT. Lee S. Newman y Jay H. Newman. Crown Publishers, 1974.

THE PENGUIN BOOK OF KITES. David Pelham. Penguin Books, 1976.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA SUPERFICIE DE MARTE, Raymond E. Arvidson, Alan B. Binder y Kenneth L. Jones
La nave espacial Viking ha aportado pruebas de la conformación de esta superficie por obra de los volcanes, los impactos de meteoritos, el agua y el viento.

EL FLUJO DE ENERGIA EN UN ECOSISTEMA FORESTAL, James R. Gosz, Richard T. Holmes, Gene E. Likens y F. Herbert Bormann
La vida en la tierra se sostiene por la cantidad finita de energía solar que fijan las plantas verdes. El estudio cuantitativo del flujo de energía de un bosque ha mostrado de qué manera se distribuye y controla esta energía.

COMO FABRICAN ATP LAS CELULAS, Peter C. Hinkle y Richard E. McCarty
La teoría predominante es la quimiosmótica. La luz o la oxidación transportan protones a través de la membrana; se forma así el compuesto, rico en energía ATP, al retornar los protones por entre un conjunto de enzimas.

PIETER BRUEGEL EL VIEJO: UNA GUIA PARA EL ESTUDIO DE LA TECNOLOGIA DEL SIGLO XVI, H. Arthur Klein
El gran artista flamenco sentía un profundo interés por las ideas científicas y por las máquinas de su tiempo. Consecuencia de este hecho es que muchas de sus obras ofrecen atisbos poco corrientes acerca de los conocimientos prácticos de hace 400 años.

PRODUCCION MUNDIAL DE PETROLEO, Andrew R. Flower
Las existencias de petróleo en el subsuelo son limitadas, al igual que su tasa de recuperación. Antes de terminar el siglo, el suministro de crudos será incapaz de abastecer la demanda.

LEPTONES PESADOS, Martin L. Perl y William T. Kirk
La clase de partículas elementales que comprende el electrón y el muon se ha enriquecido con un nuevo miembro: la partícula tau. Puede tratarse muy bien de la cabeza de serie de una secuencia de leptones pesados dotados de carga.

LA GENETICA MOLECULAR DE LAS POBLACIONES: SELECCIONISTAS CONTRA NEUTRALISTAS, Antonio Fontdevila
La controversia entre neutralistas y seleccionistas se ha centrado básicamente en los polimorfismos proteicos detectables electroforéticamente. Al principio se pensó que esta fracción podía ser representativa de todo el genoma. Hoy se tienen serias dudas.

MATEMATICA COMBINATORIA Y PLANIFICACION, Ronald L. Graham.
¿Cuál es el mejor método de racionalización del trabajo, de suerte que concluya en el tiempo más corto posible?

INVESTIGACION Y CIENCIA